



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**ÚČINNOST ODVODU TEPLA PARNÍHO
GENERÁTORU JE DUKOVANY PŘI NÍZKÝCH
HLADINÁCH**

THE HEAT DISSIPATION EFFICIENCY OF THE STEAM GENERATOR DUKOVANY AT LOW
WATER LEVELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Veselý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Jakub Veselý
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Účinnost odvodu tepla parního generátoru JE Dukovany při nízkých hladinách

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je věnována provozním stavům parogenerátoru JE Dukovany. V rámci práce bude zpracován podrobný matematický popis přestupu tepla v parogenerátoru při různé úrovni zaplavení svazků teplosměnných trubek.

Cíle diplomové práce:

1. Uvést popis parogenerátoru, přehled provozních parametrů a technických požadavků.
2. Uvést analytické řešení přenosu tepla v parogenerátoru pro různou výšku hladiny.
3. Zpracovat detailnější (numerické) řešení přenosu tepla v parogenerátoru pro různou výšku hladiny.

Seznam doporučené literatury:

MICHELE, František. 1974. Strojní zařízení jaderných elektráren. Parní a plynové turbíny, parogenerátory, čerpadla. Brno: VUT Brno.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Bibliografická citace práce: VESELÝ, J. *Účinnost odvodu tepla parního generátoru JE Dukovany při nízkých hladinách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Jako autor uvedené diplomové práce prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Obsahem práce je simulace průběhu události blackout v Jaderné elektrárně Dukovany a určení optimálního postupu vychlazení studených větví smyček primárního okruhu s cílem zajistit maximální množství sekundárního chladiva pro následný odvod zbytkového tepla, aby měl provozní personál co nejvíce času na obnovu elektrického napájení.

V první části práce je popsán přehled jaderných elektráren v České republice a ve světě a potencionální výstavba dalších reaktorových bloků. Detailní popis parního generátoru v Jaderné elektrárně Dukovany je uveden ve třetí kapitole. Následující kapitola shrnuje proběhlé události blackout ve světě, události v ČR, které byly blízko blackoutu, a dále současné řešení problému blackout v Jaderné elektrárně Dukovany.

Stěžejní část práce je uvedena v kapitolách 6 a 7. V té se detailně popisuje matematický model přibližující chování reaktorového bloku při události blackout a jsou v ní uvedeny analýzy daných výsledků.

Klíčová slova:

Jaderná elektrárna Dukovany, parní generátor, parogenerátor, blackout, přestup tepla.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to simulate the course of events during Dukovany Nuclear Power Plant blackout and to determine the optimal process of cooling down the cold branches of the primary circuit loops to secure the maximum amount of the primary fuel needed for the residual heat outlet so that the operating staff has as much time as possible for renewing the electric power supply.

The first part of the thesis describes nuclear power plants built in the Czech Republic and in the world as well as reactor blocks whose construction is being considered. The detailed description of Dukovany's steam generator is shared in chapter three. Following chapter summarizes blackouts that occurred at power plants around the world, events that might have led to blackouts in the Czech Republic, and it also describes current approach to blackout problematics at Dukovany Nuclear Power Plant.

Chapters six and seven contain the core of the thesis. That includes detailed description of a mathematical model explaining the behaviour of a reactor block during blackout as well as the analysis of the results found.

Key words:

Dukovany Nuclear Power Plant, steam generator, blackout, heat transfer.

Obsah

SEZNAM ZKRATEK.....	3
1 ÚVOD	5
2 JADERNÁ ENERGETIKA VE SVĚTĚ	7
2.1 JADERNÁ ENERGETIKA V ČESKÉ REPUBLICCE	11
2.1.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN	12
2.1.2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY	12
2.1.3 NOVÉ JADERNÉ ZDROJE V ČR	12
3 PARNÍ GENERÁTORY.....	13
3.1 PARNÍ GENERÁTOR VVER 440	13
3.1.1 ÚČEL	13
3.1.2 POPIS	13
3.1.3 ZAPOJENÍ V TEPELNÉM SCHÉMATU.....	16
4 BLACKOUT	19
4.1 NEJVĚTŠÍ BLACKOUTY VE SVĚTĚ.....	19
4.2 BLACKOUTY V EVROPĚ A V ČESKÉ REPUBLICCE	19
5 SOUČASNÉ ŘEŠENÍ BLACKOUTU NA JE DUKOVANY	19
5.1 OČEKÁVANÝ PRŮBĚH BLACKOUTU.....	20
6 VÝPOČET PRŮBĚHU BLACKOUTU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY	23
6.1 VÝPOČET TEORETICKÉHO SOUČiniteLE PROSTUPU TEPLA	23
6.1.1 SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA NA PRIMÁRNÍ STRANĚ.....	25
6.1.2 KOEFICIENT TEPELNÉ VODIVOSTI.....	25
6.1.3 SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ SEKUNDÁRNÍHO MÉDIA	26
6.2 POROVNÁNÍ TEORETICKÉHO SOUČiniteLE PROSTUPU TEPLA S MĚŘENÍM	26
6.3 VÝPOČET SKUTEČNÉHO SOUČiniteLE PROSTUPU TEPLA	26
6.4 VÝPOČET POČÁTEČNÍCH STAVŮ PRO RŮZNÉ ČASY ZAHÁJENÍ VYCHLAZOVÁNÍ.....	28
6.5 VÝPOČET ČASOVÉHO PRŮBĚHU HLADINY V PG	28
6.5.1 STAV STUDENÉ VĚTVE SMYČKY	29
6.5.2 STAV HORKÉ VĚTVE SMYČKY	29
6.5.3 STAV AKTIVNÍ ZÓNY	29
6.5.4 STAV PRIMÁRNÍ ČÁSTI PG	30
6.5.5 PŘEDANÉ TEPLA Z PRIMÁRNÍHO OKRUHU.....	30
6.5.6 TLAK V PG.....	30
6.5.7 STAV SEKUNDÁRNÍ ČÁSTI PG	31
6.5.8 ODVEDENÉ MNOŽSTVÍ PÁRY.....	31
6.5.9 POKLES HLADINY V PG.....	32

7 ANALÝZA VÝSLEDKŮ SIMULACÍ.....	33
7.1 POČÁTEK VYCHLAZOVÁNÍ 360 S PO BLACKOUTU	33
7.2 POČÁTEK VYCHLAZOVÁNÍ 600 S PO BLACKOUTU	33
7.3 POČÁTEK VYCHLAZOVÁNÍ 1 200 S PO BLACKOUTU	33
7.4 POČÁTEK VYCHLAZOVÁNÍ 1 800 S PO BLACKOUTU	33
7.5 POČÁTEK VYCHLAZOVÁNÍ 2 400 S PO BLACKOUTU	34
7.6 POČÁTEK VYCHLAZOVÁNÍ 3 600 S PO BLACKOUTU	34
7.7 POROVNÁNÍ VARIANT VYCHLAZOVÁNÍ.....	34
8 ZÁVĚR	37
9 PŘÍLOHY	39
10 POUŽITÁ LITERATURA	57

SEZNAM ZKRATEK

EDU	elektrárna Dukovany
HCČ	hlavní cirkulační čerpadlo
I.O.	primární okruh
II.O.	sekundární okruh
JE	jaderná elektrárna
PG	parní generátor
PSA	přepouštěcí stanice do atmosféry
TG	turbogenerátor

1 ÚVOD

Elektrická energie je jedním ze základních spotřebních produktů moderní doby. Bez její existence by společnost, jak ji známe dnes, nemohla existovat. Její možnost přeměny v jiné formy energie a relativně nízké ztráty při distribuci od výrobce až ke spotřebiteli z ní dělají nepostradatelnou službu v domácnostech i ve velkých výrobních závodech. Existuje několik způsobů, jak přeměňovat různé formy energie v energii elektrickou, ale v globálním měřítku jsou nejvíce využívanou možností elektrárny nebo teplárny s Rankine-Clausiovým nebo Brytonovým cyklem.

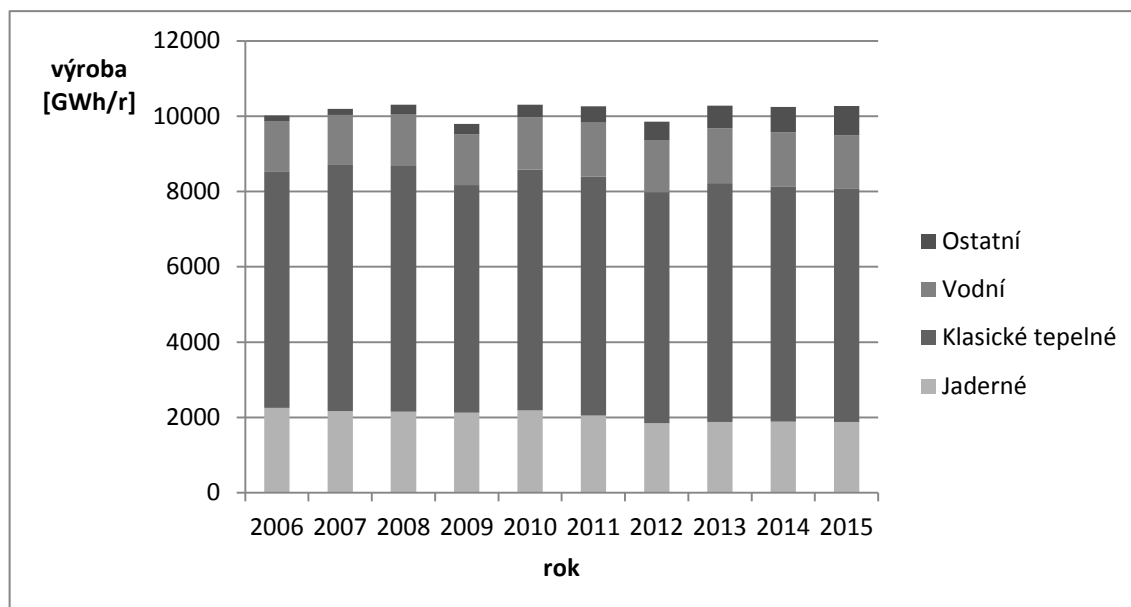
Stejně tak je tomu i v Jaderné elektrárně Dukovany, kde se pomocí Rankine-Clausiova cyklu přeměňuje v parní turbíně tepelná energie syté páry v energii mechanickou. Tato energie se přenáší přes hřídel do generátoru, kde probíhá konečná transformace na energii elektrickou.

Nejhorší stav v jaderné elektrárně je takový, při němž dojde k úplné ztrátě elektrické energie z vnější sítě a žádný systém sloužící pro podání záložního napětí není provozuschopný. Takový stav nazýváme blackout. Při tomto stavu dochází k postupnému vypařování sekundárního chladiva v parních generátorech až do stavu, kdy prostup tepla z I.O. do II.O. klesne pod úroveň zbytkového tepla z reaktoru a teplota chladiva primárního okruhu začíná růst. Tento stav je nutné co nejvíce oddálit, aby byl vytvořen dostatečný časový prostor pro obnovu elektrického napájení.

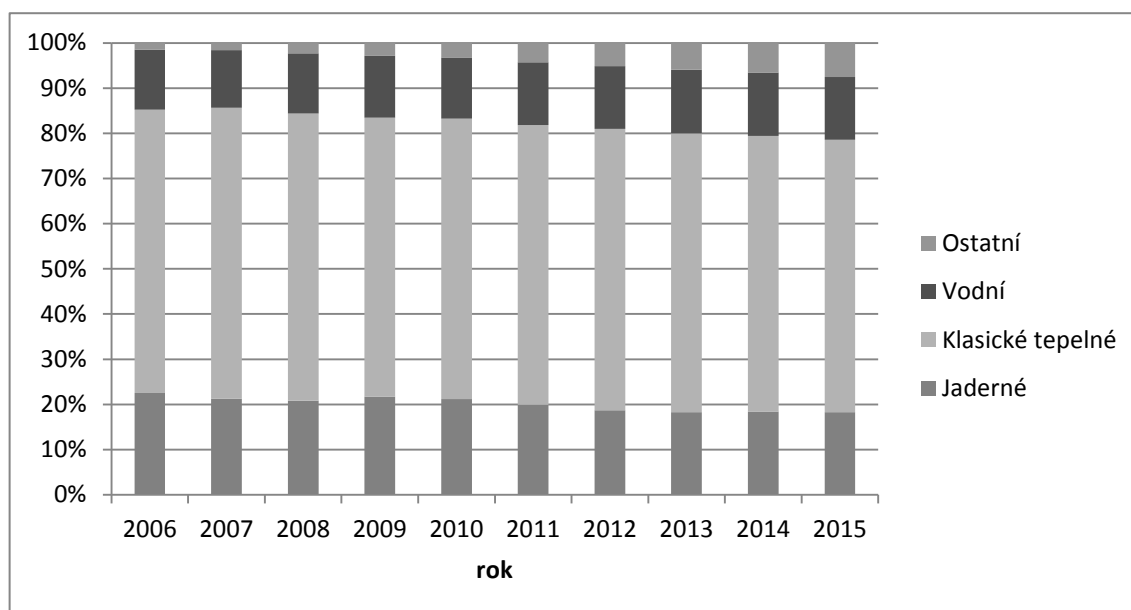
Úkolem této diplomové práce je stanovit optimální postup vychlazování primárního okruhu tak, aby v parních generátorech zůstalo co nejvíce chladiva pro následný odvod zbytkového tepla z aktivní zóny. Dále diplomová práce určí nejnižší hladinu v PG na počátku vychlazování, při které lze ještě dosáhnout teploty studených větví smyček I.O. na 240 °C.

2 JADERNÁ ENERGETIKA VE SVĚTĚ

Rozdělení výroby elektrické energie podle jednotlivých zdrojů zobrazují obr. 1 a obr. 2.



obr. 1 Rozdělení výroby elektrické energie podle zdrojů [22]



obr. 2 Rozdělení výroby elektrické energie podle zdrojů [22]

Z grafů je patrné, že elektrická energie vyrobená z jaderných elektráren za posledních deset let dosahovala přibližně 2 000 GWh, a tím se na výrobě podílela z asi dvaceti procent. Stále největší význam pro celosvětovou energetiku má výroba elektrické energie z klasických tepelných elektráren. Nicméně i z pohledu stále sílícího tlaku na zvyšování podílu nízkouhlíkových zdrojů energie bude mít jaderná energetika do budoucna svoje nezastupitelné místo. Obnovitelné zdroje

energie se kvůli své nevyzpytatelnosti a nemožnosti regulace nehodí pro pokrytí základního zatížení. Stabilní zdroj elektrické energie tedy bude stále potřeba.

Dle MAAE [23] bylo k 31. prosinci 2015 v provozu 441 jaderných reaktorů s celkovým instalovaným elektrickým výkonem 382,3 GW. Dalších 67 reaktorů s elektrickým výkonem 66,4 GW je ve výstavbě a 167 reaktorů s celkovým elektrickým výkonem 174,5 GW je plánováno nebo je ve stavu návrhu. Největší rozvoj zažívá jaderná energetika v Číně, kde se staví 20 reaktorů, následuje Rusko s osmi a Indie s šesti reaktory. Významné výrobce elektrické energie ve světě shrnuje tab. 1.

tab. 1 Významní výrobci elektrické energie [23]

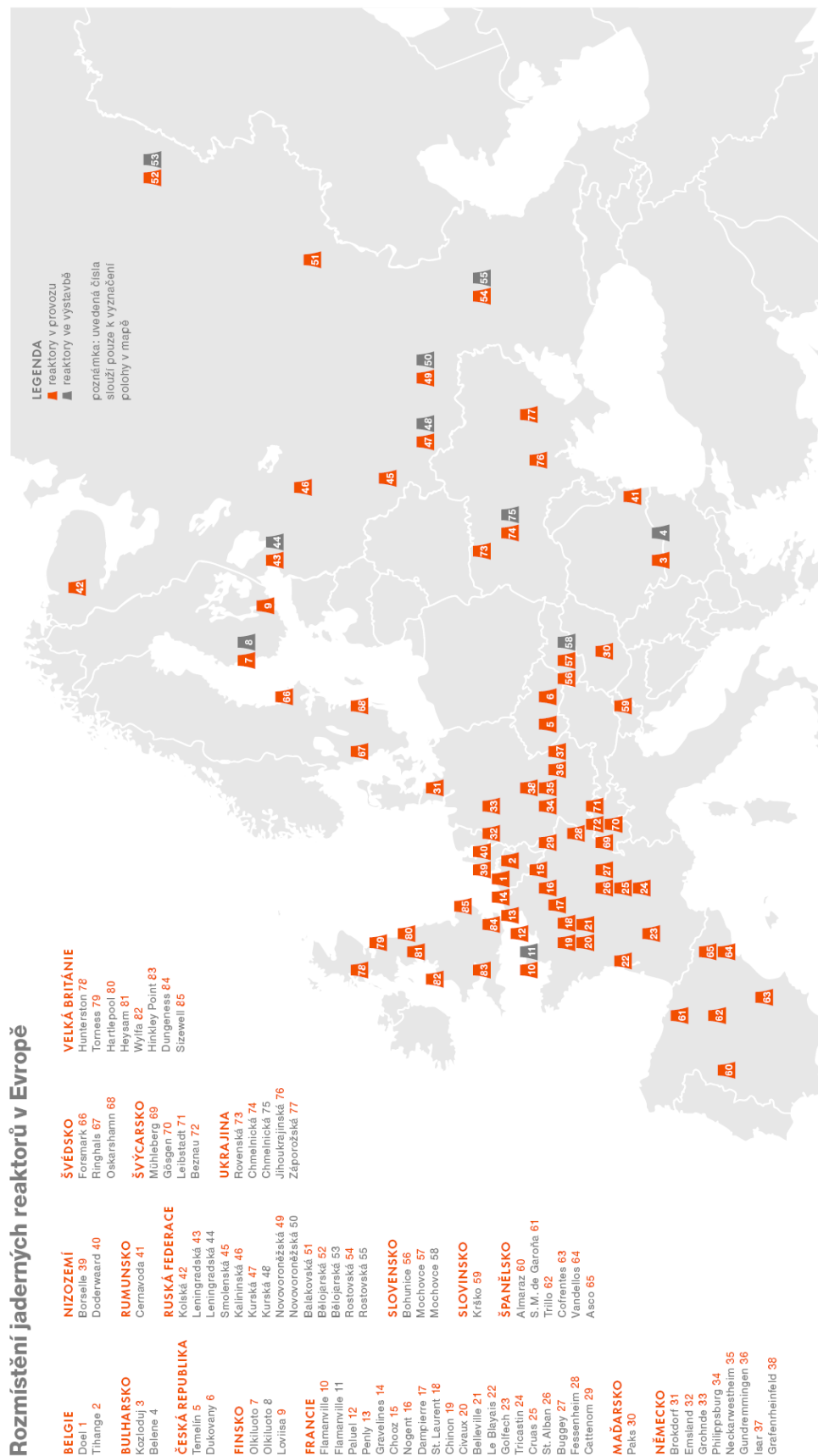
země	Reaktory v provozu		Reaktory ve výstavbě	
	počet	instalovaný výkon	počet	instalovaný výkon
	[-]	[GW]	[-]	[GW]
Čína	31	36,8	24	24,1
Indie	21	5,3	6	3,9
Rusko	35	25,4	8	6,6
Spojené Arabské Emiráty	0	0,0	4	5,4
USA	99	99,2	5	5,6
ostatní	255	215,6	20	20,8
celkem	441	382,3	67	66,4

Evropa zažívá po události v japonské elektrárně Fukušima v roce 2011 výrazný útlum. Jaderná energetika Evropy je shrnuta v tab. 2 a na obr. 3.

tab. 2 Jaderná energetika v Evropě [23]

Země	Reaktory v provozu		Reaktory ve výstavbě	
	počet	instalovaný výkon	počet	instalovaný výkon
	[-]	[GW]	[-]	[GW]
Bělorusko	0	0,00	2	2,40
Belgie	7	5,90	0	0,00
Bulharsko	2	1,90	0	0,00
Česká republika	6	3,90	1	1,60
Finsko	4	2,70	1	1,70
Francie	58	63,10	1	1,80
Německo	8	10,70	0	0,00
Maďarsko	4	1,90	0	0,00
Rumunsko	2	1,30	0	0,00
Slovensko	4	1,80	2	0,90
Slovinsko	1	0,70	0	0,00
Španělsko	7	7,10	0	0,00
Švédsko	10	9,60	0	0,00
Švýcarsko	5	3,30	0	0,00
Ukrajina	15	13,10	2	1,90
Velká Británie	15	8,90	0	0,00

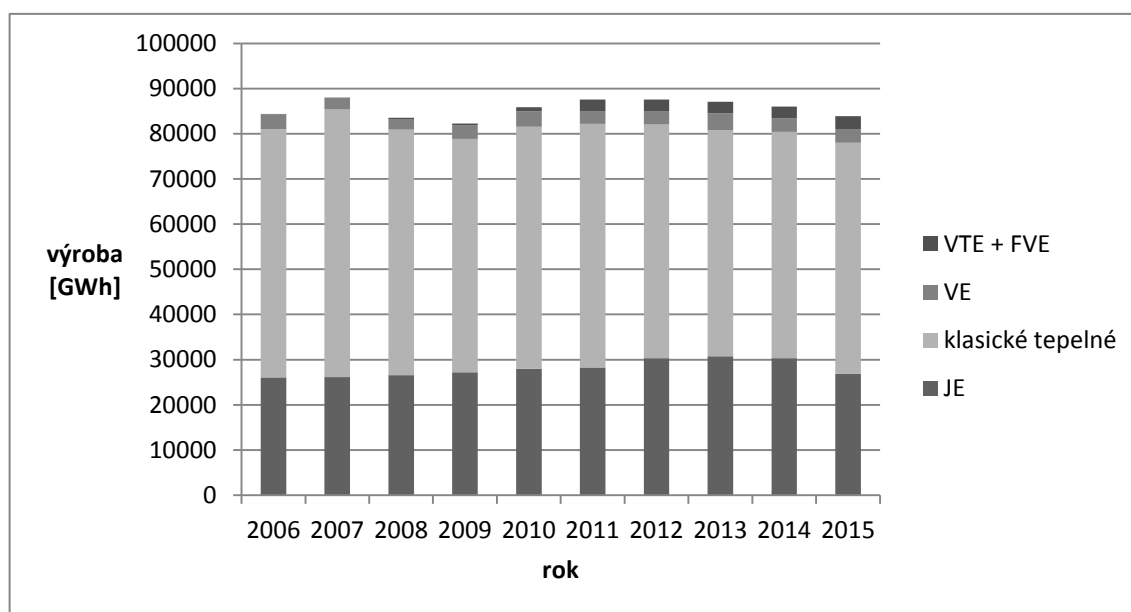
Nové jaderné zdroje se v současnosti staví ve Francii (Flamanville 3, EPR, 1x 1 630 MW), ve Finsku (Olkiluoto 3, EPR, 1 600 MW) v Bělorusku (Ostrovets 1 a 2, VVER-1200, 2x 1 200 MW) a na Slovensku (Mochovce 3 a 4, VVER-440, 2x 440 MW). Nové jaderné zdroje jsou plánovány ve Velké Británii (Hinkley Point 1 a 2, EPR, 2x 1 600 MW), v Maďarsku (Paks 5 a 6, VVER-1200, 2x 1 200 MW), ve Finsku (Hanhikivi 1, VVER-1200, 1 200 MW) a v Litvě (Visaginas 1, ABWR, 1 350 MW). V současnosti se jaderná energetika v Evropě podílí na výrobě elektrické energie zhruba z jedné třetiny. [18] [16] [26]



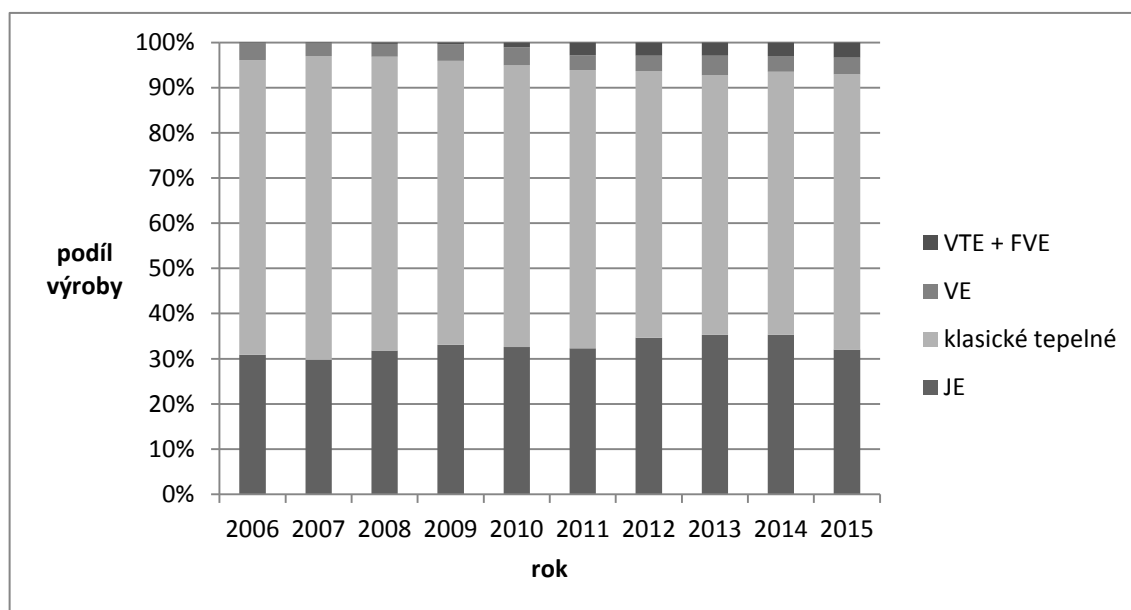
obr. 3 Jaderné elektrárny v Evropě [24]

2.1 Jaderná energetika v České republice

Vývoj výroby elektrické energie a podíl jednotlivých zdrojů shrnují obr. 4 a obr. 5.



obr. 4 Vývoj výroby elektrické energie v ČR [19]



obr. 5 Podíl výroby elektrické energie v ČR [19]

V České republice se nachází dvě jaderné elektrárny: Jaderná elektrárna Temelín a Jaderná elektrárna Dukovany. Obě jsou vlastněny společností ČEZ, jejímž majoritním vlastníkem je český stát. Dukovany a Temelín s instalovaným výkonem 4 150 MW a se svou stabilní výrobou zhruba 30 000 GWh pokrývají spotřebu elektrické energie v České republice přibližně z jedné třetiny.

2.1.1 Jaderná elektrárna Temelín

Elektrárna se nachází v Jižních Čechách asi 5 km od Týna nad Vltavou. Skládá se ze dvou výrobních bloků s tlakovodními reaktory VVER-1000 s projektovým instalovaným elektrickým výkonem 1 000 MW. Historie sahá až do roku 1979, kdy byl vydán investiční záměr postavit v lokalitě čtyři reaktorové bloky. Výstavba začala v roce 1987, ale po politickém převratu v roce 1989 bylo rozhodnuto o dokončení pouze dvou bloků. První elektrickou energii začala dodávat v prosinci 2000. Po několika modernizačních projektech zvyšující účinnost činí aktuální instalovaný výkon 1 078 MW a 1 055 MW. [17]

2.1.2 Jaderná elektrárna Dukovany

Elektrárna se nachází v kraji Vysočina asi 30 km od města Třebíče. V lokalitě se nachází čtyři tlakovodní reaktory ruského typu VVER-440 V213č. o celkovém projektovém instalovaném výkonu 1 760 MW. Výstavba započala v roce 1978 a poslední blok byl dokončen v roce 1987. První blok ale začal dodávat elektrickou energii do sítě již v roce 1985. V současnosti je elektrárna za svojí projektovou životností, nicméně díky velkým investičním akcím během posledních let se počítá s provozem až do roku 2037. Instalovaný výkon byl také díky projektu Využití projektových rezerv zvýšen na aktuálních 2 040 MW. [27]

2.1.3 Nové jaderné zdroje v ČR

Výběrové řízení na dostavbu 3. a 4. bloku Jaderné elektrárny Temelín bylo vyhlášeno 3. srpna 2009. Současná situace na trhu s energií a další faktory, především přednostní nákup energií z obnovitelných zdrojů a nízká cena zemního plynu, nepříznivě ovlivňují ekonomickou návratnost zamýšleného kroku. Tendr byl na jaře roku 2014 zrušen, protože česká vláda nemohla garantovat výkupní ceny elektrické energie, a pokud by trend vývoje ceny pokračoval současným trendem, byla by výstavba za 200 až 300 miliard Kč nerentabilní. [25]

Nicméně národní akční plán rozvoje jaderné energetiky zdůrazňuje neodkladné zahájení přípravy na dostavbu jednoho reaktorového bloku v Dukovanech do roku 2037, pro zajištění nepřerušného provozu, a jednoho bloku v Jaderné elektrárně Temelín. Vše z důvodu zajištění energetické bezpečnosti, protože se předpokládá postupné odstavování velkých uhelných elektráren a výstavba nových není v plánu. Jaderná energetika by se do roku 2050 měla podílet na výrobě elektrické energie v České republice z 50 %. [20]

3 PARNÍ GENERÁTORY

Parní generátor plní dvě funkce:

- 1) výměník tepla mezi primárním a sekundárním okruhem,
- 2) fyzická bariéra mezi aktivním primárním a neaktivním sekundárním chladivem. [9]

Parní generátor se vyskytuje v každé jaderné elektrárně, jejíž energetický okruh je rozdělen na primární a sekundární. Existují tři základní koncepce parních generátorů používané v různých typech jaderných elektráren:

- 1) horizontální parní generátory používané v tlakovodních elektrárnách východní koncepce,
- 2) vertikální parní generátory pro tlakovodní reaktory západní koncepce,
- 3) článkové parní generátory využívané v reaktorech chlazené sodíkem. [9]

Jaderná elektrárna Dukovany je východního konceptu, takže v ní byly použity parní generátory horizontálního typu.

3.1 Parní generátor VVER 440

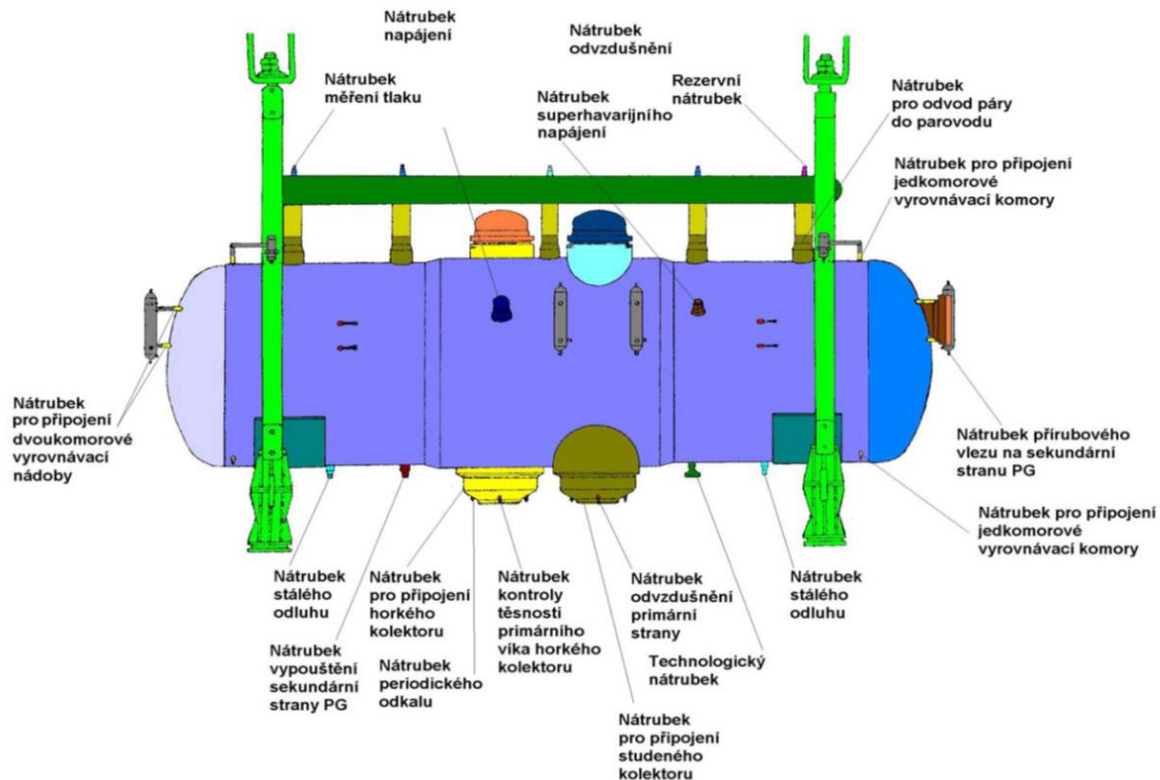
3.1.1 Účel

Parní generátor typu VVER 440 je tepelný výměník, který tvoří bariéru mezi primárním a sekundárním okruhem. Patří mezi základní zařízení primárního okruhu. Jeho podstatou je umožnit přenos tepelné energie z primárního okruhu do sekundárního (v některých případech náběhu bloku opačným směrem) bez přenosu hmoty. Tím je zabezpečeno, že veškerá zařízení tvořící sekundární okruh elektrárny nejsou kontaminována.

3.1.2 Popis

Jedná se o horizontální výměník tepla typu výparníku. V Jaderné elektrárně Dukovany se nachází šest parních generátorů na každý reaktorový blok. Jsou umístěny v hermetickém boxu v místnosti A201. Parní generátor se skládá:

- 1) z tělesa,
- 2) z pojistných ventilů,
- 3) ze systému odluhů a odkalů.



obr. 6 Boční pohled na PG VVER 440 [2]

Těleso PG je tvořeno:

- 1) pláštěm a horkým a studeným dnem,
- 2) vnitřními vestavbami.

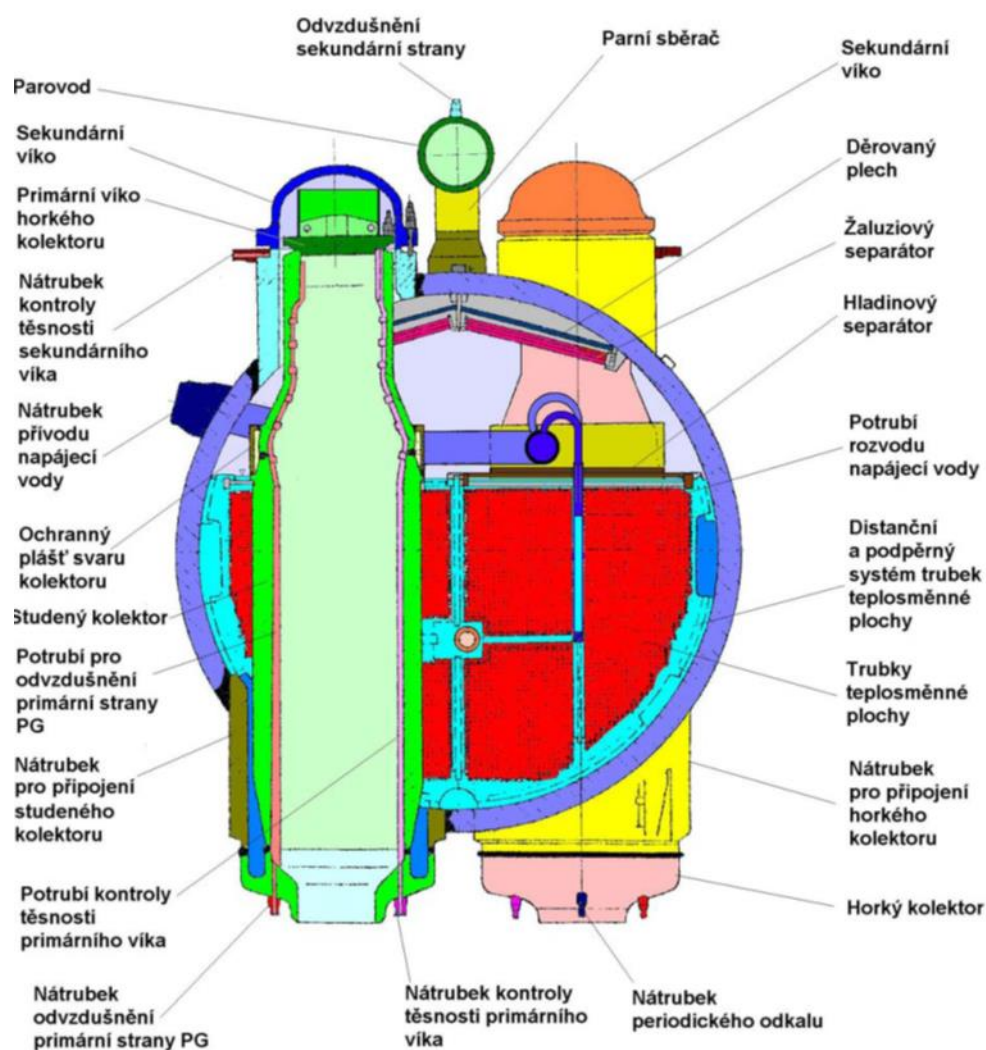
Plášť o průměru 3 210 mm a délce 11 800 mm je svařenec ze čtyř silnostěnných kroužků, dva o tloušťce stěny 75 mm a dva o tloušťce 135 mm. Horké a studené dno eliptického tvaru o síle stěny 184 mm jsou k plášti přivařena. Na plášti a dnech se nachází několik technologických nátrubků: [7]

- 1) dva nátrubky pro připojení horké a studené větve smyčky,
- 2) pět nátrubků pro připojení parního sběrače,
- 3) jeden nátrubek pro přívod napájecí vody,
- 4) jeden nátrubek pro přívod demineralizované vody od superhavarijního napájecího čerpadla,
- 5) dva nátrubky odluhu,
- 6) jeden nátrubek vypouštění sekundární strany,
- 7) nátrubek přívodového vstupu pro vnitřní revize,
- 8) nátrubky pro připojení měření hladiny a tlaku,
- 9) nátrubky kontroly těsnosti primárního víka a odvodu primární strany navařeny na nátrubky horkého a studeného kolektoru.

Vnitřní vestavby můžeme rozdělit na:

- 1) horký a studený kolektor,
- 2) trubkový svazek o 5 536 trubiček, které tvoří teplosměnnou plochu,
- 3) rozvod napájecí vody,
- 4) separátor vlhkosti.

Trubičky trubkového svazku ve tvaru písmene „U“ mají průměr 16 mm a sílu stěny 1,4 mm. Do kolektoru jsou zaválcovány výbuchem a zavařeny. Trubičky jsou uloženy v distančních elementech podpěrného systému. Rozvod napájecí vody je realizován kolektorem umístěným nad teplosměnnou plochou a jednotlivé odbočky ústí pod hladinu. Přívod demineralizované vody při havarijních podmínkách je zaústěn pod separátor vlhkosti nad teplosměnnou plochu. Před doplňováním tímto způsobem je bezpodmínečně nutné zvýšit hladinu v PG nad teplosměnnou plochu. Jinak hrozí poškození trubiček vlivem teplotního šoku. [7]



obr. 7 Příčný řez parním generátorem VVER 440 [2]

Systém odluhů a odkalů slouží pro udržování optimálního chemického režimu PG. Začátek prvního potrubí kontinuálního odluhu je umístěn na dně tělesa, druhý se nachází asi 20 cm pod nominální hladinou, což je kóta největší koncentrace solí.

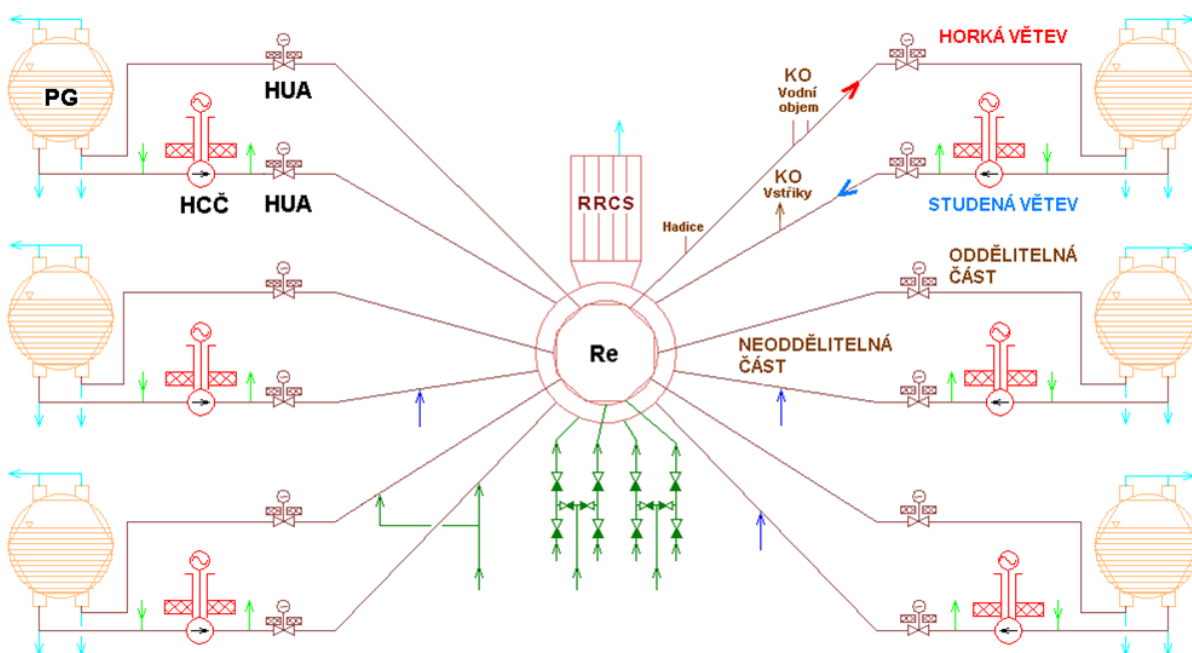
Tři impulsní pojistné ventily zabráňují nepřipustnému zvýšení tlaku v PG za provozu a jsou s PG neoddělitelně spojeny. Nachází se mimo hermetický prostor na hlavním parovodu vedoucím z PG.

Plášť a obě dna jsou vyrobeny z nízkolegované uhlíkové oceli. Nátrubky kolektorů a veškeré vestavby jsou vyrobeny z austenitické nelegované oceli a k plášti jsou přivařeny heterogenním svařem.

Těleso je zavěšeno pomocí volných závěsů. Toto řešení umožňuje dilataci primárního potrubí směrem od reaktoru, který je pevným bodem. [1]

3.1.3 Zapojení v tepelném schématu

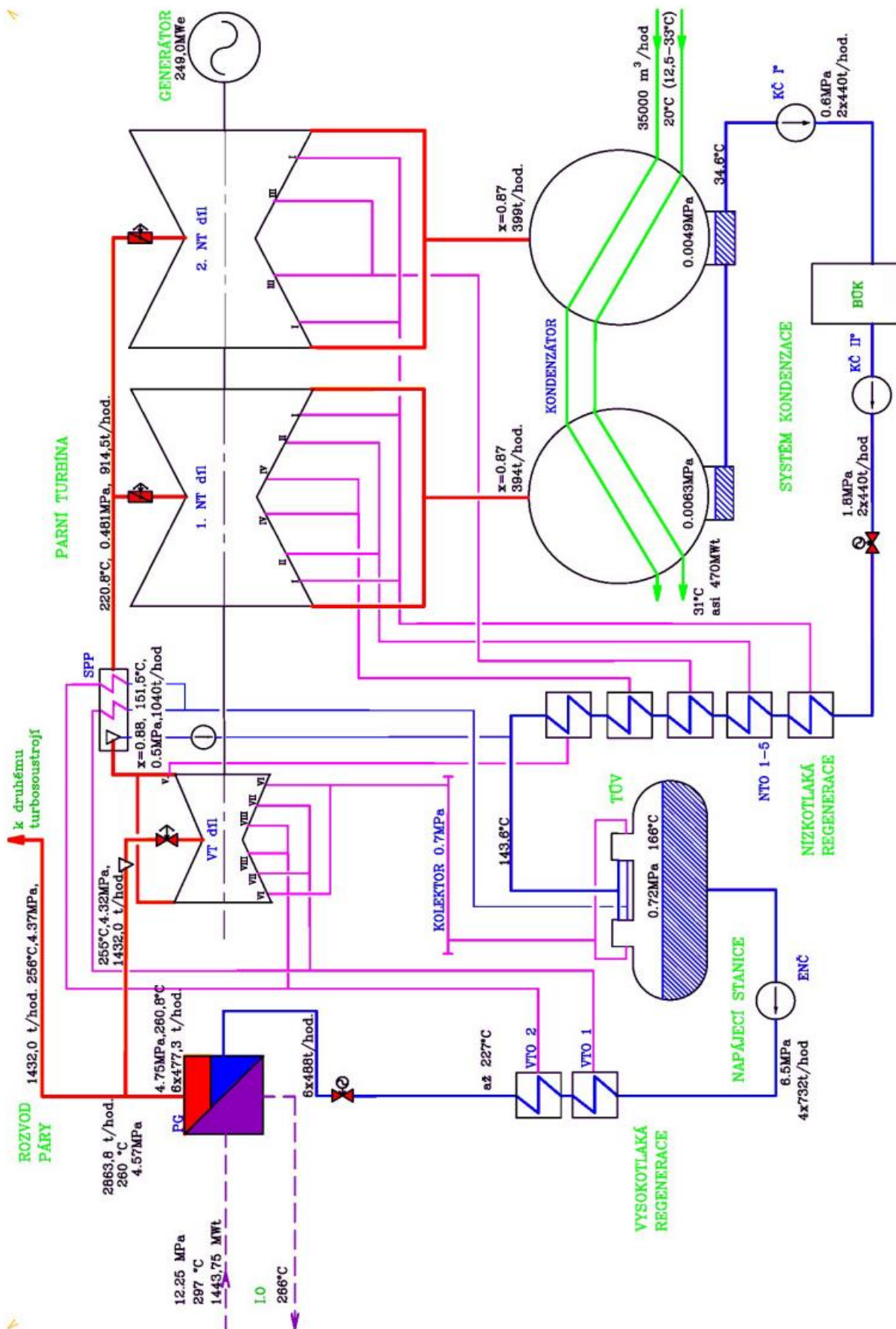
Celková tepelná energie z reaktoru (1 444 MW) je odváděna pomocí šesti cirkulačních smyček. Každá smyčka se skládá z cirkulačního potrubí o jmenovité světlosti 500 mm, parního generátoru, hlavního cirkulačního čerpadla a dvou hlavních uzavíracích armatur. Chladivo primárního okruhu o přetlaku 12,26 MPa a teplotě 267 °C je nasáváno oběžným kolem hlavního cirkulačního čerpadla a je čerpáno potrubím studené větve smyčky přes „studnou“ hlavní uzavírací armaturu do reaktoru. Zde je proud chladiva směřován pomocí vestaveb reaktoru a prochází aktivní zónou, kde je ohřát o 30 °C. Do horké větve cirkulačního potrubí proudí tedy chladivo o teplotě 297 °C přes „horkou“ hlavní uzavírací armaturu do horkého kolektoru parního generátoru. Z horkého kolektoru je celkový průtok smyčkou cca. 7 200 t/h distribuován do jednotlivých trubiček teplosměnné plochy. Přes stěny odevzdá tepelnou energii napájecí vodě v mezitrubkovém prostoru a ochladí se na počátečních 267 °C. Po průchodu teplosměnnou plochou proudí chladivo do studeného kolektoru PG a zpět do studené větve cirkulačního potrubí.



obr. 8 Schéma zapojení parních generátorů v primárním okruhu [2]

Napájecí voda o teplotě 228 °C, tlaku 4,8 MPa a průtoku 480 t/h do každého parogenerátoru je rozváděna kolektorem napájecí vody do mezitrubkového prostoru pod hladinu. Zde absorbuje tepelnou energii z chladiva primárního okruhu, probíhá dohřev napájecí vody na 262 °C a její var. Asi 5 t/h z každého PG je odluhováno. Sytá pára o teplotě 270 °C, tlaku 4,8 MPa a průtoku 475 t/h stoupá vzhůru, prochází separátorem vlhkosti do parního sběrače a odtud parovodem do hlavního parního kolektoru. Parní kolektor je spojovník parního výkonu ze všech šesti parních generátorů. Z něj je pára distribuována dvěma parovody ke každé turbíně. Sekundární okruh

obsahuje dvě turbíny o elektrickém výkonu 250 MW. Každým parovodem parní turbíny proudí 720 t/h páry o teplotě 255 °C a přetlaku 4,34 MPa. Pára prochází vysokotlakovým dílem, kde expanduje a předává asi 45 % své celkové předané energie. Z VT dílu je napojeno několik neregulovaných odběrů, které snižují celkový průtok na výstupu na 1 050 t/h při teplotě 150 °C a přetlaku 0,37 MPa. Před vstupem do nízkotlakového dílu je pára přehřívána v separátoru-přehříváči, kde je odseparováno 100 t/h separátu, a pára je izobaricky ohřáta na teplotu 220 °C pomocí odběrů z VT dílu. Do NT dílu tedy vstupuje 950 t/h páry. Po průchodu nízkotlakovým dílem pára o nízkých parametrech (35 °C a 5 kPa) vstupuje do kondenzátoru. Hlavní kondenzát o teplotě 12,5-33 °C je čerpán dvěma kondenzátními čerpadly s tlakem na výtlačku 0,5 MPa obtokem blokové úpravy kondenzátu na sání druhého stupně kondenzátních čerpadel o tlaku na výtlačku 1,8 MPa přes nízkotlakovou regeneraci, která hlavní kondenzát ohřeje odběrovou parou z NT dílu na teplotu 145 °C. Vlivem tlakových ztrát má hlavní kondenzát před vstupem do napájecí nádrže přetlak 0,75 MPa. V odplyňovačích umístěných před dvěma napájecími nádržemi je kondenzát dohřán parou ze šestého odběru na mez sytosti na 167 °C. Napájecí nádrže, každá shromažďující hlavní kondenzát ze své turbíny, jsou propojeny po vodní i parní straně. Z napájecích nádrží sají čtyři napájecí čerpadla. Každé z čerpadel o průtoku 720 t/h a tlaku na výtlačku 6,5 MPa dopravují napájecí vodu přes dvě paralelně zapojené vysokotlakové regenerace, topené z odběrů VT dílu, ohřívající napájecí vodu na 228 °C, zpět do šesti parogenerátorů přes napájecí hlavy, každá o průtoku 480 t/h. [13]



obr. 9 Schéma zapojení parních generátorů v sekundárním okruhu [13]

4 BLACKOUT

Blackout je rozsáhlý kolaps elektrizační soustavy způsobený nedostatkem nebo nadbytkem elektrické energie. Historie ukazuje, že jsou scénáře blackoutu více než pravděpodobné.

4.1 Největší blackoutu ve světě

První z velkých rozpadů elektrické sítě se odehrál v lednu 2011 v Indii. Bez elektrické energie se ocitlo 230 milionů lidí, včetně 11 milionů obyvatel města Dillí. Výpadek byl způsoben zvýšenou poptávkou, která snížila frekvenci sítě, na což zareagovaly ochranné systémy a tyto linky odpojily. Celkové ekonomické ztráty byly odhadnuty na 100 mil. USD.

K dalšímu významnému blackoutu došlo 19. srpna 2005 na indonéských ostrovech Bali a Jáva. Došlo zde k selhání linky 500 kV a k odpojení některých elektráren. Na 100 milionů Indonésanů se ocitlo bez elektrické energie.

Největší blackout, který oddělil celkem 320 miliónů obyvatel od elektrické energie, se stal 30. až 31. července 2012 opět v Indii. Příčinou bylo přetížení a následný výpadek 400 kV linky Bina-Gwalior.

Jeden z největších blackoutů se odehrál 1. listopadu 2014 v Bangladéši. Ovlivnil přes 90 % obyvatel republiky a byl způsoben odstavením linky z Indie.

Poslední z pěti nejhorších blackoutů uzavírá Pákistán. V lednu 2015 došlo tamními rebely k sabotáži a poškození vyvedení elektrické energie z místní elektrárny. Tato akce následně zapříčinila rozpad sítě a odpojení 80 % obyvatel od elektrické sítě. [28]

4.2 Blackouty v Evropě a v České republice

Ačkoliv se z předchozích odstavců může zdát, že blackout hrozí pouze na Dálném východě, mnohokrát došlo ke ztrátám vnější sítě i v Evropě, i když ne tak rozsáhlým. Nejplošnější z nich se odehrály v Dánsku a ve Švédsku na jaře 2003, na podzim v Itálii téhož roku. Blackoutu čelili obyvatelé také v Řecku v létě v roce 2004 a v Německu o dva roky později. [30]

Několikrát byla i česká elektrizační soustava na pokraji blackoutu. 24. července 2006 došlo z důvodu požáru k vypnutí Slovinské rozvodny Diviča. Tím došlo k přetížení 400 kV vedení v rozvodně v Hradci u Kadaně a k jejímu následnému vypnutí. Důsledek byl provoz části české elektrizační soustavy v nestálém ostrovním provozu. Po jedné hodině byla soustava opět propojena. Další událostí, kdy došlo téměř k rozpadu elektrizační soustavy, byl orkán Emma, který v březnu 2008 zpřetrhal 400 kV vedení mezi transformátorovny Chodov a Čechy Střed. Do výstavby provizorního vedení byly ostatní linky přetíženy a byly také blízko odpojení, což by opět vedlo k rozpadu sítě. V neposlední řadě je neustálé riziko blackoutu s příčinou v severním Německu s větrnými farmami s velkým instalovaným výkonem. Zvýšené větrné podmínky vedou k okamžité nadvýrobě elektrické energie, kterou nelze pokrýt primární regulací. Obrovské toky jsou přenášeny ze severu na jih přes Českou republiku, především přes zmíněnou rozvodnu Hradec. [30] Možným řešením k předejití blackoutu s příčinou v Německu je instalace tzv. PST (fázového) transformátoru. [21]

5 SOUČASNÉ ŘEŠENÍ BLACKOUTU NA JE DUKOVANY

Z pohledu jaderné elektrárny Dukovany je blackout ztráta vnějších zdrojů napájení, nezregulování turbín na vlastní spotřebu a nepodání napájení ani z jednoho ze tří

diesलगенераторů. [4] Nejnebezpečnější je tzv. station blackout, což je výpadek na všech čtyřech reaktorových blocích současně. Jedná se o nadprojektovou událost. Aktivní zóna i po havarijním odstavení produkuje tzv. zbytkové teplo, které vzniká jadernými přeměnami nestabilních radionuklidů vznikajících při štěpné řetězové reakci. Tyto reakce nelze zastavit a z tohoto důvodu je nutné neustálé chlazení palivových souborů, aby nedošlo k přehřátí jaderného paliva, porušení jeho hermetického pokrytí a úniku radionuklidů do chladiva primárního okruhu. Primární okruh je výškově postaven tak, že při výpadku HCČ je aktivní zóna stále chlazena přirozeným prouděním a nepotřebuje tedy žádný vnější zdroj elektrické energie. Toto bohužel neplatí pro sekundární okruh Jaderné elektrárny Dukovany, který potřebuje elektrickou energii pro dopravu napájecí vody do parního generátoru, který odebírá tepelnou energii primárnímu okruhu. Z tohoto důvodu je nutné neustálé napájení vybraných spotřebičů, které zabezpečují odvod tepla.

Na základě tzv. stress testů, které proběhly na všech evropských jaderných elektrárnách po události v japonské elektrárně Fukušima, bylo prokázáno, že Jaderná elektrárna Dukovany je před vnějšími vlivy, které mohou způsobit blackout, odolná. Bylo vydáno několik doporučení, která byla v nedávné době realizována. Jedná se o instalaci dvou tzv. AAC diesलगенераторů, které by byly v případě blackoutu schopny napájet důležité spotřebiče odvádějící teplo z aktivní zóny. Dále se jedná o tzv. prostředky DAM (diverse and mobile), které by v případě blackoutu plnily parní generátory napájecí vodou:

- 1) mobilní požární čerpadla a nově instalované potrubí pro jeho připojení a pro doplňování parních generátorů, které mohou sáť:
 - a) ze tří zásobních nádrží demineralizované vody, každá o objemu 1 123 m³,
 - b) z čističů v úpravě chladicí vody s celkovou kapacitou 12 000 m³,
 - c) z hasičské cisterny (29 m³),
 - d) z bazénů pod chladicími věžemi a z bazénů pod novými ventilátorovými věžemi [10].
- 2) mobilní diesलगенерátory s kabelovými vozy a přenosnými elektrocentrálami, kterými lze napájet dochlazovací čerpadla.

Tyto dodatečné prostředky by měly v konečném důsledku zajistit udržení dostatečné hladiny v parních generátorech pro schopnost odvodu zbytkového tepla z reaktoru. V případě, že všechny tyto prostředky selžou (což je velmi nepravděpodobné), dojde k postupnému vypaření objemu napájecí vody na sekundární straně parního generátoru a ztrátě odvodu tepla. Jelikož simulátor blokové dozorny není schopen režimy při nízkých hladinách v parním generátoru simulovat [14], byl odborem Jaderná bezpečnost EDU zadán požadavek na podrobnou analýzu prostupu tepla v parním generátoru při nízkých hladinách. Analýza bude sloužit jako doporučení na změnu vnitřních předpisů řešících tuto událost.

5.1 Očekávaný průběh blackoutu

I po odstavení reaktoru se v aktivní zóně generuje tzv. zbytkové teplo, které je vzniká rozpadem štěpných produktů a radioaktivních přeměn transuranů. Toto zbytkové teplo je nutné odvádět přes sekundární okruh až do atmosféry. Výškové rozložení primárního okruhu umožňuje vytvořit samovolné přirozené proudění pouze na základě fyzikálních zákonů, takže není třeba žádný pohon k cirkulaci chladiva skrz aktivní zónu. To pouze za předpokladu, že je z parních generátorů umístěných výše než aktivní zóna odváděna tepelná energie. Takovou výsadu ovšem sekundární okruh nemá. K cirkulaci chladiva vyžaduje čerpadlo s elektrickým napájením. V případě, že elektrické napájení není k dispozici, způsobí produkce zbytkového tepla postupný nárůst teploty chladiva v reaktoru, tím dojde ke zvýšení tlaku v PG, automatickému otevření PSA a nevratnému úniku sekundárního chladiva do atmosféry. Postupně klesá hladina ve všech PG a dochází k odhalování teplosměnné plochy a tím k jejímu zmenšování [4], neboť pára ochlazující

horní odhalené trubky teplosměnné plochy má několikanásobně nižší součinitel přestupu tepla než voda. Až teplosměnná plocha není schopna odvézt všechno teplo z primárního okruhu, začne teplota v reaktoru opět růst. Růst teploty vede k růstu objemu chladiva a tím k růstu tlaku v primárním okruhu. Tento jev je velmi nebezpečný, protože při vzrůstu tlaku nad otevírací tlak pojistného ventilu primárního okruhu dojde k jeho automatickému otevření a ztráty chladiva z reaktoru. Celá událost může při neobnovení elektrického napájení vést až k odhalení aktivní zóny, následnému tavení paliva, zničení tlakové nádoby reaktoru a úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí.

Dalším závažným aspektem události blackout je ohrožení ucpávek hlavního cirkulačního čerpadla. Za normálního, abnormálního i havarijního provozu jsou ucpávky HCC chlazený systémem normálního doplňování primárního okruhu. Tento systém vytváří ochranný tepelný štít. Při ztrátě napájení čerpadel normálního doplňování se horké chladivo o teplotě 270 °C protlačí ze studené větve smyčky přes ucpávky HCC do systému organizovaných úniků. Ucpávky však na tuto teplotu nejsou konstruovány. Očekává se jejich degradace, která po 45 minutách způsobí průraz, čímž dojde k nevratnému úniku primárního chladiva do místnosti, ve kterých se čerpadla nachází. Úkolem posádky blokové dozorny je během absence elektrického napájení vychladit primární okruh tak, aby bylo ve studené větvi smyčky dosaženo teploty 240 °C [4], při které je prokázáno, že degradace ucpávek HCC nenastane dříve než za 8 hodin, kdy už se předpokládá obnova napájení.

Očekává se postupný rozvoj události. Nejpravděpodobnější příčinou ztráty všech vnějších zdrojů napájení v EDU je zničení venkovní rozvodny vlivem silného větru. Nejprve výrobní blok ztratí nezajištěné napájení, ze kterého jsou napájena hlavní cirkulační čerpadla primárního okruhu. Díky výpadku těchto pohonů dochází k automatickému odstavení reaktoru. Jelikož zbytkový výkon klesá s časem přibližně exponenciálně, je čas mezi odstavením reaktoru a vznikem blackoutu zásadní a každé prodloužení tohoto času hraje při následných událostech velkou roli. I po zničení venkovní rozvodny má Jaderná elektrárna Dukovany mnoho vnitřních zdrojů napájení, tzv. zajištěného napájení. Jedná se o 12 dieselgenerátorů, každý o výkonu 2,8 MW, dále dva tzv. AAC dieselgenerátory, každý o výkonu 3,5 MW. Událost blackout očekává neprovozuschopnost všech těchto zařízení, takže nejdůležitější části technologie elektrárny, mezi které patří měření, regulace a malé stejnosměrné a střídavé pohony, jsou napájeny z akumulátorových baterií s omezenou kapacitou. Mezi tyto části také patří PSA, kterou lze v tuto chvíli použít pro vychlazení primárního okruhu. [4]

Personál blokové dozorny přechází po odstavení reaktoru do postupů pro likvidaci mimořádných stavů. V této době se očekává náběh minimálně jednoho dieselgenerátoru, který napájí čerpadlo pro havarijní doplňování parních generátorů, a hladina v PG je tedy stále nominální. Očekávaný rozvoj události způsobí neprovozuschopnost všech dieselgenerátorů, takže výrobní blok ztratí veškeré elektrické napájení vyjma spotřebičů napájených z akumulátorových baterií. Při tomto stavu přechází personál blokové dozorny do postupu ECA-0.0: Ztráta elektrického napájení – Blackout. Po počátečních ověřovacích krocích v tomto postupu a neúspěšném pokusu o obnovení napájení se začíná vychlazovat primární okruh přes PSA, případně přes pojistné ventily PG trendem do 30 °C/h na teplotu studených větví smyček pod 240 °C. Po dosažení této teploty se provádí následné manipulace s cílem napájet parní generátory dalšími havarijními způsoby – gravitačním plněním z napájecí nádrže, která je umístěna asi o osm metrů výše než PG, případně dochlazovacím čerpadlem, které může být napájeno z mobilního dieselgenerátoru, a dále přenosným čerpadlem hasičského záchranného sboru podniku. Všechna tato čerpadla mají závěrný tlak kolem 1 MPa, tlak v napájecí nádrži ještě menší, takže pro jejich využití je nejprve nutné PG odtlakovat. Dalším velice nebezpečným jevem, který provází havarijní doplňování PG, je teplota oné doplňované vody. V případě použití gravitačního plnění napájecí nádrže nebo

dochlazovacího čerpadla, které má sání z napájecí nádrže, se tato teplota bude pohybovat kolem 164 °C a níže v závislosti na postupném chladnutí. Při použití přenosného čerpadla teplota doplňovaného média nepřesáhne 30 °C v závislosti na venkovní teplotě. Parní generátory jsou v tuto dobu nahřáté na teplotu v primárním okruhu, tedy cca. 240–280 °C. Styk horkého kovu s chladným médiem by s velkou pravděpodobností vedl k vytvoření trhlin v materiálu a následnému úniku mírně radioaktivního primárního média do sekundárního okruhu a dále do životního prostředí. Tento stav je neakceptovatelný a doplňování parních generátorů alternativními prostředky je uvažováno jako jedna z posledních možností. [4]

Úkolem této diplomové práce je stanovit optimální postup vychlazování primárního okruhu tak, aby v parních generátorech zůstalo co nejvíce chladiva pro následný odvod zbytkového tepla z aktivní zóny, a aby nemusely být použity prostředky alternativního doplňování PG, které by mohly vést k roztěsnění teplosměnné plochy a úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Práce také určí minimální hladinu v PG na začátku vychlazování, při které je ještě možné dosáhnout teploty ve studených větvích smyček I.O. 240 °C.

Předpoklad je takový, že čím dříve se začne I.O. vychlazovat, tím bude konečná hladina vyšší. Důvodem je generované zbytkové teplo, které produkuje páru, čímž dochází ke zbytečnému úbytku sekundárního chladiva. Předběžný návrh na zlepšení havarijního postupu ECA-0.0 je jeho doplnění okamžitých činností o další, a to o okamžité zahájení vychlazování po ověření absence elektrického napájení.

6 VÝPOČET PRŮBĚHU BLACKOUTU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

V programu Microsoft Excel s pomocí doplňku XSteam byl vytvořen matematický model části primárního a sekundárního okruhu, který by s dostatečnou přesností simuloval skutečný průběh možného scénáře události blackout v Jaderné elektrárně Dukovany. Tato kapitola je rozdělena na čtyři části:

1. výpočet teoretického součinitele prostupu tepla v PG,
2. výpočet součinitele prostupu tepla z naměřených hodnot,
3. výpočet počátečních stavů pro různé časy zahájení vychlazování,
4. simulace parametrů průběhu události při vychlazování s úplným otevřením obou větví PSA.

Počáteční hodnoty parametrů byly odečteny z [31]. Simulovány byly průběhy pro počátek vychlazování 360, 600, 1 200, 1 800, 2 400 a 3 600 sekund po vzniku blackoutu, a to pro vychlazování s maximálním otevřením obou větví PSA.

Průběh události s trendem vychlazování 30 °C/h nebyl simulován, neboť jak ukazují analýzy VÚJE Trnava [15], čím vyšší je trend vychlazování, tím vyšší je konečná hladina v PG. Dále maximální trend vychlazování s ohledem na tlakovou nádobu reaktoru je 60 °C/h. [5] Nicméně pokud budeme uvažovat stabilizaci na teplotě 240 °C, pokles z původních cca. 270 °C při nominálním výkonu reaktoru, docílíme změny teploty maximálně 30 °C. I při teoretické skokové změně teploty tedy nemůže dojít k překročení hodinového trendu 60 °C/h.

6.1 Výpočet teoretického součinitele prostupu tepla

Sdílení tepla mezi primárním a sekundárním okruhem probíhá přes tepelný výměník – parní generátor. Z primárního média se tepelná energie přesouvá do materiálu teplosměnné plochy pomocí přestupu tepla. V materiálu teplosměnné plochy probíhá tzv. přenos tepla vedením. A nakonec tepelná energie prochází z materiálu teplosměnné plochy do sekundárního chladiva opět přestupem tepla.

Sdílení tepla vychází ze zákona zachování energie. Ten říká, že energie vstupující do soustavy se rovná součtu energie akumulované v soustavě a energii ze soustavy vycházející: [8]

$$E_{in} = \Delta E_{ak} + E_{out} \quad (6.1)$$

Pokud bychom neuvažovali akumulaci energie, platí, že tepelný tok vcházející do soustavy se rovná tepelnému toku ze soustavy vycházející:

$$E_{in} = E_{out} \quad (6.2)$$

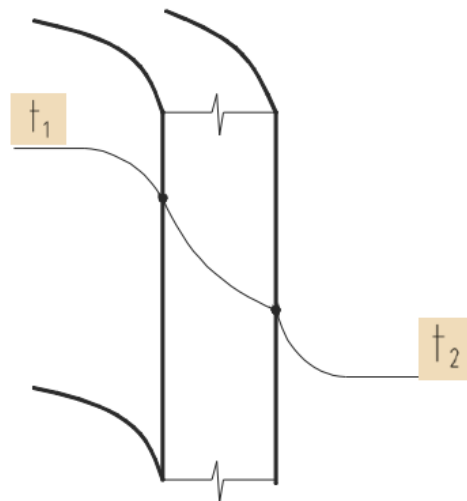
Energie je časový integrál přeneseného tepelného výkonu:

$$E = \int_0^t P \, dt \quad (6.3)$$

Tepelný výkon přenesený teplosměnnou plochou PG, kterou aproximujeme jako válcovou plochu délky L_{TSP} , vypočteme z rovnice prostupu tepla: [11]

$$P_{PG} = k_v \cdot L_{TSP} \cdot \Delta t_{ln} \quad (6.4)$$

Průběh teploty je ukázán na obr. 10.



obr. 10 Průběh teplot při sdílení tepla pomocí válcové teplosměnné plochy [12]

Δt_{ln} je logaritmický teplotní spád mezi primárním a sekundárním chladivem. Pro malé rozdíly teplot lze využít vztahů:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \quad (6.5)$$

$$\Delta t_1 = t_{HVS} - t_p \quad (6.6)$$

$$\Delta t_2 = t_{SVS} - t_{PG} \quad (6.7)$$

t_p je teplota syté páry v parovodech, t_{PG} teplota sytého sekundárního chladiva v parním generátoru. Uvažuje se, že je teplota sekundárního chladiva v celém objemu PG konstantní, a jelikož se chladivo nachází na mezi sytosti, tak platí:

$$t_{PG} = t_p \quad (6.8)$$

Součinitel prostupu tepla pro sdílení tepla válcovou stěnou má následující tvar: [11]

$$k_v = 2\pi \cdot \left(\alpha_{in} \cdot r_{in} + \frac{\lambda_t}{\ln \frac{r_{out}}{r_{in}}} + \alpha_{out} \cdot r_{out} \right) \quad (6.9)$$

kde α_{in} je součinitel přestupu tepla mezi vnitřním médiem a materiálem teplosměnné plochy, λ_t je součinitel tepelné vodivosti materiálu teplosměnné plochy, α_{out} je součinitel přestupu tepla

mezi materiálem teplosměnné plochy a vnějším médiem. r_{in} a r_{out} jsou vnitřní a vnější poloměry trubky.

6.1.1 Součinitel přestupu tepla na primární straně

Součinitel α_{in} můžeme vypočítat z Nusseltova čísla Nu_d , vnitřního průměru trubky D_{in} a ze střední tepelné vodivosti primárního chladiva proudící trubkami parního generátoru $\overline{\lambda_{IO}}$:

$$Nu_d = \frac{\frac{D_{in}}{\overline{\lambda_{IO}}}}{\frac{1}{\alpha_{in}}} = \frac{\alpha_{in} \cdot D_{in}}{\overline{\lambda_{IO}}} \quad (6.10)$$

$$\alpha_{in} = \frac{Nu_d \cdot \overline{\lambda_{IO}}}{D_{in}} \quad (6.11)$$

Pro rozvinuté turbulentní proudění v rozsahu hodnot $l/d > 50$ a $Re > 10\,000$ lze využít vztahu: [9]

$$Nu_d = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{st}}\right)^{0,25} \quad (6.12)$$

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné kritérium stanovující typ proudění a vypočítá se pomocí střední rychlosti proudění w , ekvivalentního průměru D_e a dynamické viskozity média v :

$$Re = \frac{w \cdot D_e}{v} \quad (6.13)$$

Rychlost proudění primárního chladiva trubkami PG se určí z objemového průtoku a průtočného průřezu:

$$w_{IO} = \frac{\dot{V}_{IO}}{S_{IO}} \quad (6.14)$$

Střední tepelná vodivost primárního chladiva proudící trubkami parního generátoru $\overline{\lambda_{IO}}$ je funkcí teploty média. Lze ji aproximovat následující funkcí: [3]

$$\overline{\lambda_{IO}} = 0,571 + 0,001\,66 \cdot \overline{t_{IO}} - 0,000\,005\,9 \cdot \overline{t_{IO}}^2 \quad (6.15)$$

Teplota $\overline{t_{IO}}$ je střední teplota primárního chladiva v trubkách parního generátoru a spočítá se jako aritmetický průměr vstupní a výstupní teploty primárního chladiva:

$$\overline{t_{IO}} = \frac{t_{HVS} + t_{SVS}}{2} \quad (6.16)$$

6.1.2 Koeficient tepelné vodivosti

Koeficient tepelné vodivosti materiálu trubky parního generátoru VVER 440 při zahrnutí 0,049 mm tlusté vrstvy kotelního kamene má hodnotu $\lambda_t = 11,98 \text{ W / m} \cdot \text{K}$. [29]

6.1.3 Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média

Objemový var je závislý na přeneseném tepelném výkonu na jednotku teplosměnné plochy \dot{q} a na tlaku. Pro výpočet součinitele přestupu tepla na straně sekundárního média pro bublinkový var vody v rozsahu tlaků $0,02 < p < 10$ MPa můžeme využít empirický vztah: [6]

$$\alpha_{\text{out}} = 3,97 \cdot \dot{q}^{0,7} \cdot p^{0,176} \quad (6.17)$$

Tlak je v tomto konkrétním případě tlak v PG a do vztahu se dosazuje v jednotkách MPa. Přenesený tepelný výkon na jednotku teplosměnné plochy \dot{q} je dán celkovým přeneseným výkonem teplosměnné plochy parního generátoru P_{PG} a velikostí teplosměnné plochy A_{TSP} :

$$\dot{q} = \frac{P_{\text{PG}}}{A_{\text{TSP}}} \quad (6.18)$$

Velikost teplosměnné plochy je při nominální hladině v parním generátoru $A_{\text{PG}} = 2640 \text{ m}^2$. [29]

6.2 Porovnání teoretického součinitele prostupu tepla s měřením

Výpočet α_{out} se zakládá na empirickém vztahu, který byl měřen v laboratorních podmínkách na jednoduchém modelu. Při porovnání hodnoty součinitele prostupu tepla vypočteného teoretickými vzorci se součinitelem vypočteným ze simulovaných hodnot simulátoru EDU, který vychází z naměřených hodnot provozu reaktorového bloku, se hodnoty značně liší. Velkou roli také může hrát zanesení teplosměnné plochy vodním kamenem, takže koeficient vedení tepla v aktuálním čase nemusí odpovídat tabulkové hodnotě. Součinitel prostupu tepla vypočtený z empirických rovnic je pro účely matematického modelu nepoužitelný, v dalších výpočtech byl tedy uvažován vypočtený součinitel z měření na simulátoru EDU. Postup jeho výpočtu je uveden v následující kapitole.

6.3 Výpočet skutečného součinitele prostupu tepla

Koeficient prostupu tepla byl určen z parametrů v [31] z ustáleného stavu. Ustálený stav během blackoutu byl určen $\tau = 1200 \text{ s}$ od odstavení reaktoru. Parametry shrnuje tab. 3.

tab. 3 Ustálený stav události blackout simulovaný na trenažéru EDU [31]

veličina	označení	hodnota	rozměr
zbytkový výkon aktivní zóny	P_{AZ}	29,07	MW
hladina v PG	L_{PG}	1,88	m
teplota chladiva v horkých větvích I.O.	t_{HVS}	279,1	°C
teplota chladiva ve studených větvích I.O.	t_{SVS}	264,4	°C
tlak v PG	p_{PG}	5,00	MPa

Z tlaku v PG určíme tabulkové hodnoty chladiva a páry:

$$t'_p = f(p_{PG})$$

$$i'' = f(p_{PG})$$

$$i' = f(p_{PG})$$

$$\rho' = f(p_{PG})$$

Výparné teplo chladiva sekundárního okruhu:

$$l_{PG} = i'' - i' \quad (6.19)$$

Dále byly z tabulek určeny entalpie a hustoty chladiva horkých a studených větví I.O:

$$i_{HVS} = f(p_{KO}, t_{HVS})$$

$$i_{SVS} = f(p_{KO}, t_{SVS})$$

$$\rho_{HVS} = f(p_{IO}, t_{HVS})$$

$$\rho_{SVS} = f(p_{KO}, t_{SVS})$$

Entalpický spád na aktivní zóně:

$$\Delta i_{AZ} = i_{HVS} - i_{SVS} \quad (6.20)$$

Průtok aktivní zónou:

$$P_{AZ} = \dot{M}_{AZ} \cdot \Delta i_{AZ} \quad (6.21)$$

$$\dot{M}_{AZ} = \frac{P_{AZ}}{\Delta i_{AZ}} \quad (6.22)$$

Výkon vstupující do jednoho PG:

$$P_{PG,in} = \frac{P_{AZ}}{n_{PG}} \quad (6.23)$$

kde n_{PG} je počet parních generátorů v primárním okruhu. Velikost teplosměnné plochy a objem chladiva II.O. v PG byla odečtena z PR. 2 a PR. 3.

$$A_{PG} = f(L_{PG})$$

$$V_{PG} = f(L_{PG})$$

Této ploše odpovídá poměrná teplosměnná plocha k teplosměnné ploše při nominální hladině:

$$a_{PG} = \frac{A_{PG}}{A_{PG,nom}} \quad (6.24)$$

Délka zaplavených trubiček teplosměnné plochy:

$$L_{TSP} = a_{PG} \cdot L_{TSP,nom} \quad (6.25)$$

kde $L_{TSP,nom}$ je délka teplosměnné plochy trubiček PG při nominální hladině. Hmotnost chladiva v jednom PG je dána vztahem:

$$m_{PG1} = \rho' \cdot V_{PG} \quad (6.26)$$

Celková hmotnost chladiva v II.O:

$$m_{PG} = m_{PG1} \cdot n_{PG} \quad (6.27)$$

Tepelný výkon teplosměnné plochy PG na jeden metr délky:

$$q = \frac{P_{PG1}}{L_{TSP}} \quad (6.28)$$

Logaritmický teplotní spád pro malé rozdíly teplot lze vypočítat podle rovnic (6.5), (6.6), (6.7) a (6.8).

Součinitel prostupu tepla pro válcovou stěnu se určí z rovnice:

$$P_{PG1} = k_v \cdot L_{TSP} \cdot \Delta t_{ln} \quad (6.29)$$

$$k_v = \frac{P_{PG1}}{L_{TSP} \cdot \Delta t_{ln}}$$

Ze vztahů uvedených výše a pro hodnoty parametrů odečtené pro čas $\tau = 1\,200\text{ s}$ byl vypočten součinitel prostupu tepla pro válcovou stěnu $k_v = 13,025\text{ W / m} \cdot \text{K}$. V dalších výpočtech uvažují tento součinitel konstantní.

6.4 Výpočet počátečních stavů pro různé časy zahájení vychlazování

Zahájení vychlazování bylo simulováno v několika časech od počátku blackout. Počáteční hodnoty parametrů byly opět odečteny ze simulovaného průběhu na trenažeru EDU ze dne 27. 4. 2017. Dodatečně vypočtené parametry byly stanoveny na základě postupu výpočtu uvedeného v předchozí kapitole s uvažováním součinitele prostupu tepla pro válcovou stěnu $k_v = 13,025\text{ W / m} \cdot \text{K}$. Odečtené parametry ze simulace shrnuje PR. 8.

Ze zadání známe zbytkový výkon reaktoru P_{zb} , teplotu studených větví t_{SVS} , horkých větví t_{HVS} , tlak v PG p_{PG} a počáteční hmotnosti chladiva v jednotlivých částech modelu (m_{SVS} , m_{HVS} , m_{AZ} , m_{PGIO} , m_{PG}).

6.5 Výpočet časového průběhu hladiny v PG

Ve výpočtu se uvažuje otevření obou větví PSA v prvním časovém kroku pro maximální trend vychlazování. Soustava rovnic neumožňuje analytické řešení, proto byl pro výpočet potřebného tlaku v PG použit nástroj Řešitel v programu Microsoft Excel.

Potřebný tlak v PG se vyskytuje ve všech třech závislostech:

$$Q_{IO} = f(p_{PG})$$

$$Q_{\text{IO}} = f(p_{\text{PG}})$$

$$Q_{\text{PSA}} = f(p_{\text{PG}})$$

Iteračním výpočtem nástroje Řešitel se určí taková hodnota tlaku v PG, aby platilo, že odvedené teplo párou přes PSA je právě rovno součtu odvedeného tepla z primárního a sekundárního okruhu:

$$Q_{\text{PSA}}(p_{\text{PG}}) = Q_{\text{IO}}(p_{\text{PG}}) + Q_{\text{IO}}(p_{\text{PG}})$$

6.5.1 Stav studené větve smyčky

Z teploty studené větve smyčky t_{SVS} a tlaku v primárním okruhu p_{KO} určíme entalpii i_{SVS} , tepelnou energii chladiva E_{chl} a tepelnou energii konstrukčních částí E_{kov} :

$$i_{\text{SVS}} = f(p_{\text{KO}}, t_{\text{SVS}})$$

$$E_{\text{chl}} = m_{\text{chl}} \cdot i_{\text{SVS}} \quad (6.30)$$

$$E_{\text{kov}} = m_{\text{kov}} \cdot c_{\text{kov}} \cdot t_{\text{SVS}} \quad (6.31)$$

6.5.2 Stav horké větve smyčky

Podobně určíme stav horké větve smyčky:

$$i_{\text{HVS}} = f(p_{\text{KO}}, t_{\text{HVS}})$$

$$E_{\text{chl}} = m_{\text{chl}} \cdot i_{\text{HVS}} \quad (6.33)$$

$$E_{\text{kov}} = m_{\text{kov}} \cdot c_{\text{kov}} \cdot t_{\text{HVS}} \quad (6.34)$$

6.5.3 Stav aktivní zóny

Ze zadání také určíme stav chladiva a konstrukčních částí v aktivní zóně. Uvažuje se konstantní entalpie po celé výšce aktivní zóny jako střední hodnota entalpií studené a horké větve:

$$i_{\text{AZ}} = \frac{i_{\text{SVS}} + i_{\text{HVS}}}{2} \quad (6.35)$$

$$t_{\text{AZ}} = f(p_{\text{KO}}, i_{\text{AZ}})$$

$$E_{\text{chl}} = m_{\text{chl}} \cdot i_{\text{AZ}} \quad (6.36)$$

$$E_{\text{kov}} = m_{\text{kov}} \cdot c_{\text{kov}} \cdot t_{\text{AZ}} \quad (6.37)$$

Teplo uvolněné ze zbytkového výkonu aktivní zóny za časový interval τ :

$$Q_{\text{AZ}} = P_{\text{AZ}} \cdot \tau \quad (6.38)$$

6.5.4 Stav primární části PG

Stav je podobný stavu aktivní zóny. Opět se uvažuje konstantní entalpie chladiva rovna aritmetickému průměru horké a studené větve smyčky:

$$i_{PGIO} = \frac{i_{SVS} + i_{HVS}}{2} = i_{AZ} \quad (6.39)$$

$$t_{PGIO} = f(p_{KO}, i_{AZ}) = t_{AZ}$$

$$E_{chl} = m_{chl} \cdot i_{PGIO} \quad (6.40)$$

$$E_{kov} = m_{kov} \cdot c_{kov} \cdot t_{PGIO} \quad (6.41)$$

6.5.5 Předané teplo z primárního okruhu

Předané teplo z primárního okruhu Q_{IO} přes parní generátor je součtem změny naakumulované tepelné energie ze studené větve smyčky Q_{SVS} , tepelné energie z aktivní zóny Q_{AZ} , tepla uvolněného palivem Q_U , naakumulované tepelné energie z horké větve smyčky Q_{HVS} a primární části PG Q_{PGIO} :

$$Q_{IO} = Q_{SVS} + Q_{AZ} + Q_U + Q_{HVS} + Q_{PGIO} \quad (6.42)$$

Změna naakumulované energie v jednotlivých částech primárního okruhu se skládá ze změny tepelné energie chladiva a tepelné energie konstrukčních částí:

$$Q = \Delta E_{chl} + \Delta E_{kov} \quad (6.43)$$

Změnu naakumulované tepelné energie vypočítáme jako rozdíl energie z předchozího a současného časového kroku:

$$\Delta E = E^{(n-1)} - E^{(n)} \quad (6.44)$$

6.5.6 Tlak v PG

Přenesené teplo z primárního okruhu Q_{IO} podělené časovým krokem τ dává tepelný výkon z primárního okruhu. Pokud tento tepelný výkon dále vydělen počtem PG v primárním okruhu n_{PG} , dostáváme tepelný výkon přenesený jedním PG (P_{PG1}):

$$P_{PG1} = \frac{Q_{IO}}{\tau \cdot n_{PG}} \quad (6.45)$$

Přenesený výkon je závislý na součiniteli prostupu tepla k_v , velikosti teplosměnné plochy A_{PG} a logaritmickeém teplotním spádu mezi primárním a sekundárním okruhem Δt_{ln} . Musíme tedy snížit teplotu sekundárního chladiva na takovou hodnotu, aby se výkon přenesl. Potřebný logaritmickeý teplotní spád:

$$P_{PG1} = k_v \cdot A_{PG} \cdot \Delta t_{ln} \quad (6.46)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{P_{PG1}}{k_v \cdot A_{PG}}$$

Pro malé teplotní spády je možné logaritmický teplotní spád Δt_{ln} spočítat jako aritmetický průměr teplotních rozdílů vstupů a výstupu. Jelikož se v PG uvažuje směs syté kapaliny a syté páry, pak platí, že v celém objemu PG je stejná teplota t_{PG} :

$$\Delta t_{ln} = \frac{(t_{HVS} - t_{PG}) + (t_{SVS} - t_{PG})}{2} \quad (6.47)$$

Teplota sekundárního chladiva potřebná pro přenesení požadovaného tepelného výkonu s uvažováním předchozí rovnice je:

$$t_{PG} = \frac{t_{HVS} + t_{SVS}}{2} - \Delta t_{ln} \quad (6.48)$$

Tlak páry je tlak na mezi sytosti pro danou teplotu v PG:

$$p'_{PG} = f(t_{PG})$$

Pro danou teplotu v PG určíme entalpii páry i'' , vody i' a dále výparné teplo l_{PG} nutné pro výpočet potřebného množství odvedené páry:

$$i' = f(p_{PG})$$

$$i'' = f(p_{PG})$$

$$l_{PG} = i'' - i'$$

6.5.7 Stav sekundární části PG

Z tlaku v PG a počátečního množství chladiva určíme stav:

$$i'_{PG} = f(p_{PG})$$

$$t_{PG} = f(p_{PG})$$

$$\rho'_{PG} = f(p_{PG})$$

$$E_{chl} = m_{chl} \cdot i'_{PG} \quad (6.49)$$

$$E_{kov} = m_{kov} \cdot c_{kov} \cdot t_{PG} \quad (6.50)$$

Analogicky k přenesenému teplu z primárního okruhu Q_{IO} určíme odebrané teplo chladivu v PG Q_{PG} . Celkové odvedené teplo z primárního a sekundárního okruhu:

$$\Sigma Q = Q_{IO} + Q_{IIO} = Q_{IO} + Q_{PG} \quad (6.51)$$

6.5.8 Odvedené množství páry

Odvedené teplo ΣQ odvádíme výparným teplem l_{PG} sekundárního chladiva, kdy se sytá kapalina v PG mění v sytou páru. Množství páry Δm potřebné k odvedení tohoto tepla je:

$$\Sigma Q = \Delta m \cdot l_{PG} \quad (6.52)$$

$$\Delta m = \frac{\Sigma Q}{l_{PG}}$$

Průtok přes PSA je množství páry potřebné pro odvod tepla podělené časovým krokem τ :

$$M_{PSA} = \frac{\Delta m}{\tau} \quad (6.53)$$

Maximální hltnost PSA závisí na tlaku v PG:

$$M_{PSA,max} = f(p_{PG})$$

Charakteristika je uvedena v PR. 1. Otevření jednotlivých větví PSA h_i je poté funkcí poměrného průtoku větvemi a je dáno aproximovanou funkcí podle PR. 2:

$$\frac{h_i}{h_{i,max}} = f\left(\frac{M_{PSA}}{M_{PSA,max}}\right)$$

6.5.9 Pokles hladiny v PG

Odvedené množství páry přes PSA způsobí pokles hladiny v PG a tím zmenšení teplosměnné plochy, neboť v tomto stavu se parní generátor nedoplňuje napájecí vodou. Množství chladiva se vypočítá jako množství chladiva v PG z předchozího časového kroku snížené o odvedené množství páry:

$$M_{PG}^{(n)} = M_{PG}^{(n-1)} - \Delta m \quad (6.54)$$

Podle závislostí se poté určí nový objem chladiva, nová hladina v PG, teplosměnná plocha, poměrná teplosměnná plocha a délka teplosměnné plochy:

$$V_{PG1} = \frac{m_{PG1}}{\rho'_{PG}} \quad (6.55)$$

$$L_{PG} = f(V_{PG1})$$

$$A_{PG} = f(L_{PG})$$

$$a_{PG} = \frac{A_{PG}}{A_{PG,nom}} \quad (6.56)$$

$$L_{TSP} = a_{PG} \cdot L_{TSP,nom} \quad (6.57)$$

Charakteristiky těchto závislostí jsou uvedeny v PR. 3 a PR. 4.

7 ANALÝZA VÝSLEDKŮ SIMULACÍ

7.1 Počátek vychlazování 360 s po blackoutu

Varianta uvažuje začátek vychlazování v čase $t = 360$ s po začátku blackoutu. V tomto čase je výkon aktivní zóny $P_{AZ} = 43,05$ MW, hladina v PG $L_{PG} = 2,02$ m, teplota studených větví smyček $t_{SVS} = 267,2$ °C, tlak v PG $p_{PG} = 4,96$ MPa, hmotnost sekundárního chladiva ve všech PG $m_{PG} = 208\,919$ kg, jedna větev PSA otevřena na 60,6 % s odvodem 26,21 kg páry za sekundu. Závislosti hladiny v PG na dosažené teplotě studených větví smyčky jsou patrné z PR. 18.

Ve variantě 1 dochází v prvním simulovaném časovém kroku k otevření obou větví PSA na 100 % s odvodem 117,8 kg/s a ekvivalentním odvedeným teplem $Q_{PSA} = 23\,200$ MJ. Simulace je ukončena v čase $t = 1\,920$ s s teplotou studené větve 238,8 °C a tlakem v PG 2,14 MPa. Teploty 240 °C je ve studených větvích dosaženo při hladině v PG 0,96 m.

7.2 Počátek vychlazování 600 s po blackoutu

Varianta uvažují začátek vychlazování v čase $t = 600$ s po začátku blackoutu. V tomto čase je výkon aktivní zóny $P_{AZ} = 37,93$ MW, hladina v PG $L_{PG} = 1,97$ m, teplota studených větví smyček $t_{SVS} = 264,5$ °C, tlak v PG $p_{PG} = 4,98$ MPa, hmotnost sekundárního chladiva ve všech PG $m_{PG} = 201\,872$ kg, jedna větev PSA otevřena na 54,13 % s odvodem 23,11 kg páry za sekundu. Závislosti hladiny v PG na dosažené teplotě studených větví smyčky jsou patrné z PR. 19.

Ve variantě 2 se v prvním časovém kroku simuluje otevření obou větví PSA na 100 % s odvodem 115,7 kg/s a ekvivalentním odvedeným teplem $Q_{PSA} = 22\,898$ MJ. Simulace je ukončena v čase $t = 1\,920$ s s teplotou studené větve 239,8 °C a tlaku v PG 2,51 MPa. Teploty 240 °C je ve studených větvích dosaženo při hladině v PG 1,00 m.

7.3 Počátek vychlazování 1 200 s po blackoutu

Varianta uvažuje začátek vychlazování v čase $t = 1\,200$ s po začátku blackoutu. V tomto čase je výkon aktivní zóny $P_{AZ} = 29,07$ MW, hladina v PG $L_{PG} = 1,88$ m, teplota studených větví smyček $t_{SVS} = 264,4$ °C, tlak v PG $p_{PG} = 5,00$ MPa, hmotnost sekundárního chladiva ve všech PG $m_{PG} = 190\,371$ kg, jedna větev PSA otevřena na 41,17 % s odvodem 17,73 kg páry za sekundu. Závislosti hladiny v PG na dosažené teplotě studených větví smyčky jsou patrné z PR. 20.

Ve variantě 3 dochází v prvním simulovaném časovém kroku k otevření obou větví PSA na 100 % s odvodem 116,0 kg/s a ekvivalentním odvedeným teplem $Q_{PSA} = 22\,931$ MJ. Simulace je ukončena v čase $t = 2\,400$ s s teplotou studené větve 239,9 °C a tlaku v PG 2,69 MPa. Teploty 240 °C je ve studených větvích dosaženo při hladině v PG 0,97 m.

7.4 Počátek vychlazování 1 800 s po blackoutu

Varianta uvažuje začátek vychlazování v čase $t = 1\,800$ s po začátku blackoutu. V tomto čase je výkon aktivní zóny $P_{AZ} = 28,07$ MW, hladina v PG $L_{PG} = 1,80$ m, teplota studených větví smyček $t_{SVS} = 264,4$ °C, tlak v PG $p_{PG} = 5,00$ MPa, hmotnost sekundárního chladiva ve všech PG $m_{PG} = 180\,457$ kg, jedna větev PSA otevřena na 39,60 % s odvodem 17,12 kg páry za

sekundu. Závislosti hladiny v PG na dosažené teplotě studených větví smyčky jsou patrné z PR. 21.

Ve variantě 4 se v prvním časovém kroku simuluje otevření obou větví PSA na 100 % s odvodem 115,3 kg/s a ekvivalentním odvedeným teplem $Q_{PSA} = 22\,831$ MJ. Simulace je ukončena v čase $t = 3\,120$ s s teplotou studené větve 238,2 °C a tlaku v PG 2,38 MPa. Teploty 240 °C je ve studených větvích dosaženo při hladině v PG 0,88 m.

7.5 Počátek vychlazování 2 400 s po blackoutu

Varianta uvažuje začátek vychlazování v čase $t = 2\,400$ s po začátku blackoutu. V tomto čase je výkon aktivní zóny $P_{AZ} = 27,07$ MW, hladina v PG $L_{PG} = 1,71$ m, teplota studených větví smyček $t_{SVS} = 264,4$ °C, tlak v PG $p_{PG} = 5,00$ MPa, hmotnost sekundárního chladiva ve všech PG $m_{PG} = 170\,383$ kg, jedna větev PSA otevřena na 38 % s odvodem 16,51 kg páry za sekundu. Závislosti hladiny v PG na dosažené teplotě studených větví smyčky jsou patrné z PR. 22.

Ve variantě 5 dochází v prvním simulovaném časovém kroku k otevření obou větví PSA na 100 % s odvodem 114,8 kg/s a ekvivalentním odvedeným teplem $Q_{PSA} = 22\,742$ MJ. Simulace je ukončena v čase $t = 3\,720$ s s teplotou studené větve 238,9 °C a tlaku v PG 2,26 MPa. Teploty 240 °C je ve studených větvích dosaženo při hladině v PG 0,79 m.

7.6 Počátek vychlazování 3 600 s po blackoutu

Varianta uvažuje začátek vychlazování v čase $t = 3\,600$ s po začátku blackoutu. V tomto čase je výkon aktivní zóny $P_{AZ} = 25,70$ MW, hladina v PG $L_{PG} = 1,55$ m, teplota studených větví smyček $t_{SVS} = 264,4$ °C, tlak v PG $p_{PG} = 5,00$ MPa, hmotnost sekundárního chladiva ve všech PG $m_{PG} = 150\,255$ kg, jedna větev PSA otevřena na 36 % s odvodem 15,68 kg páry za sekundu. Závislosti hladiny v PG na dosažené teplotě studených větví smyčky jsou patrné z PR. 23.

Ve variantě 6 se v prvním časovém kroku se simuluje otevření obou větví PSA na 100 % s odvodem 113,5 kg/s a ekvivalentním odvedeným teplem $Q_{PSA} = 22\,534$ MJ. Simulace je ukončena v čase $t = 5280$ s s teplotou studené větve 241,0 °C a tlaku v PG 1,29 MPa. Teploty 240 °C ve studených větvích nelze dosáhnout.

7.7 Porovnání variant vychlazování

Při pohledu na PR. 16 je zřejmé, že všechny varianty kromě varianty 6 dosáhly teploty 240 °C ve studených větvích smyček. Oproti původnímu předpokladu, který očekával, že nejvíce chladiva zůstane při zahájení vychlazování okamžitě při zjištění blackoutu, dopadla nejlépe varianta 2 – počátek vychlazování maximálním trendem v čase $t = 600$ s. Předpoklad byl, že v časovém intervalu mezi počátkem blackoutu a počátkem vychlazování dochází vlivem odvodu zbytkového tepla ke zbytečnému odpařování sekundárního chladiva. Dosažení teploty $t_{SVS} = 240$ °C tedy nastane v pozdějším čase a celkový integrál odvedeného tepla bude vlivem zbytkového výkonu větší. PR. 24 ukazuje, že tomu tak není. Podrobnější analýzou bylo zjištěno, že velký vliv na tento fakt má velikost naakumulované tepelné energie v chladivu sekundárního okruhu. Větší množství sekundárního chladiva znamená větší potřebu odvedeného tepla pro snížení teploty tohoto chladiva. Aproximací bylo vypočteno, že optimální hladina pro zahájení vychlazování $L_{PG}(0)$ je 1,9526 m. Při zahájení vychlazování s touto hladinou je cílová teplota $t_{SVS} = 240$ °C dosažena s maximální konečnou hladinou $L_{PG}(240^{\circ}\text{C}) = 1,000\,3$ m. Je tedy zbytečné, ba i kontraproduktivní, zahajovat vychlazování I.O. okamžitě po zjištění stavu blackout.

S ohledem na výsledky v této diplomové práci je navrhované řešení následující:

Doporučuji zahájení vychlazování primárního okruhu na teplotu studených větví smyček 240 °C při hladině v PG 1,95 m maximálním trendem, tj. otevřením obou větví PSA na 100 %.

Na základě tohoto doporučení autor práce navrhuje, aby byly do předpisu ECA-0.0 Úplná ztráta napájení – blackout doplněny do stránky trvalých úkolů následující činnosti:

Při L PG = 1,95 m zahaj vychlazování I.O. na teplotu 240 °C maximálním trendem pomocí obou PSA na 100 % a na této teplotě zastabilizuj.

Dalším postupem po dosažení požadované teploty by byla stabilizace. Je zbytečné dále pokračovat ve vychlazování I.O., neboť snižování teploty spotřebovává několikanásobné množství sekundárního chladiva. Teplota 240 °C zaručí neporušenost ucpávek HCČ na minimálně osm hodin, což je dostatečná doba pro obnovu elektrického napájení elektrárny a obnovu dodávky napájecí vody do PG. Hladina v PG kolem jednoho metru zaručuje dlouhou dobu odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny, tak aby teplota v I.O. nezačala opět růst.

Dalším důležitým poznatkem je, že pokud se nezačne vychlazovat nejpozději při $L_{PG}(0) = 1,55$ m, pokles hladiny v PG způsobený odvodem zbytkového tepla je tak velký, že požadovaných 240 °C nelze dosáhnout. Obsluha blokové dozorny tedy musí zahájit vychlazování s vyšší hladinou v PG. V případě, že by se tak z jakéhokoliv důvodu stalo (nefunkční PSA i pojistné ventily PG), je na zvážení, zda za každou cenu cílové teploty dosahovat. Vysušený PG je z hlediska obnovení jeho napájení sekundární vodou velmi nebezpečný stav – došlo by k přímému styku relativně studeného chladiva s horkou teplosměnnou plochou PG, nebezpečí jeho porušení a úniku aktivního primárního chladiva do sekundárního okruhu. V případě obnovy napájení pomocí mobilního čerpadla nebo superhavarijního napájecího čerpadla tento aspekt nemá vliv. Nátrubek je navařen na horní část tělesa, takže by došlo ke styku studeného chladiva s teplosměnnou plochou vždy, pokud by hladina klesla pod nominální o 30 cm [7]. Pokud by však došlo ke zprovoznění elektronapájecího nebo havarijního čerpadla, jejichž rozvod napájecí vody je zaústěn pod vršek teplosměnné plochy, chladná napájecí voda by se nejprve promísila s vodou v PG, čímž by se ohřála, a teprve pak by přišla do styku s trubičkami teplosměnné plochy. Toto opatření by snížilo pravděpodobnost poškození teplosměnné plochy. Možnou alternativou je tedy nevychlazení až na 240 °C, nýbrž na teplotu, při které by ještě zbývalo dostatečné množství napájecí vody v PG.

8 ZÁVĚR

Parní generátor je tepelný výměník v jaderných elektrárnách se dvěma tepelnými okruhy. Tvoří bariéru mezi primárním a sekundárním okruhem. Jeho úkolem je přenos tepla z primární a sekundární části ve všech režimech. Chladivo do PG doplňují v EDU elektronapájecí čerpadla, havarijní napájecí čerpadla, případně superhavarijní napájecí čerpadla. Při události blackout přijdou všechna tato čerpadla o elektrické napájení. Zbytkový výkon aktivní zóny je odváděn přes přepouštěcí stanici do atmosféry umístěné na hlavním parním kolektoru. Odvod páry má za následek úbytek sekundárního chladiva. Jelikož není k dispozici žádné čerpadlo, které by parní generátor doplnilo, dochází k postupnému snižování hladiny a tím pádem ke snižování velikosti teplosměnné plochy pro odvod zbytkového tepla. Pokud by se elektrické napájení včas neobnovilo, mohla by velikost teplosměnné plochy klesnout natolik, že by nebyla schopna odvést veškerý zbytkový výkon aktivní zóny a teplota a tlak primárního okruhu by začaly růst. To by dále mohlo vést k nemožnosti použití vysokotlakového havarijního doplňování primárního okruhu, otevření pojistných ventilů kompenzátoru objemu a k nenávratnému úniku primárního chladiva z reaktoru. Výsledkem by mohlo být odhalení paliva v aktivní zóně a jeho poškození s únikem radioaktivních látek do životního prostředí.

Cílem této práce bylo vyhledání optimálního postupu vychlazování primárního okruhu a dosažení 240 °C ve studených větvích smyček primárního okruhu při blackoutu. Této teploty je nezbytné dosáhnout vzhledem k degradaci ucpávek hlavních cirkulačních čerpadel. Při této události dojde k výpadku napájení důležitých spotřebičů chladicí ucpávky HCC a doplňování sekundárního chladiva do PG. Ucpávky HCC vlivem průtoku horkého chladiva degradují a po 45 minutách by došlo k průrazu a k nevratnému úniku chladiva z primárního okruhu.

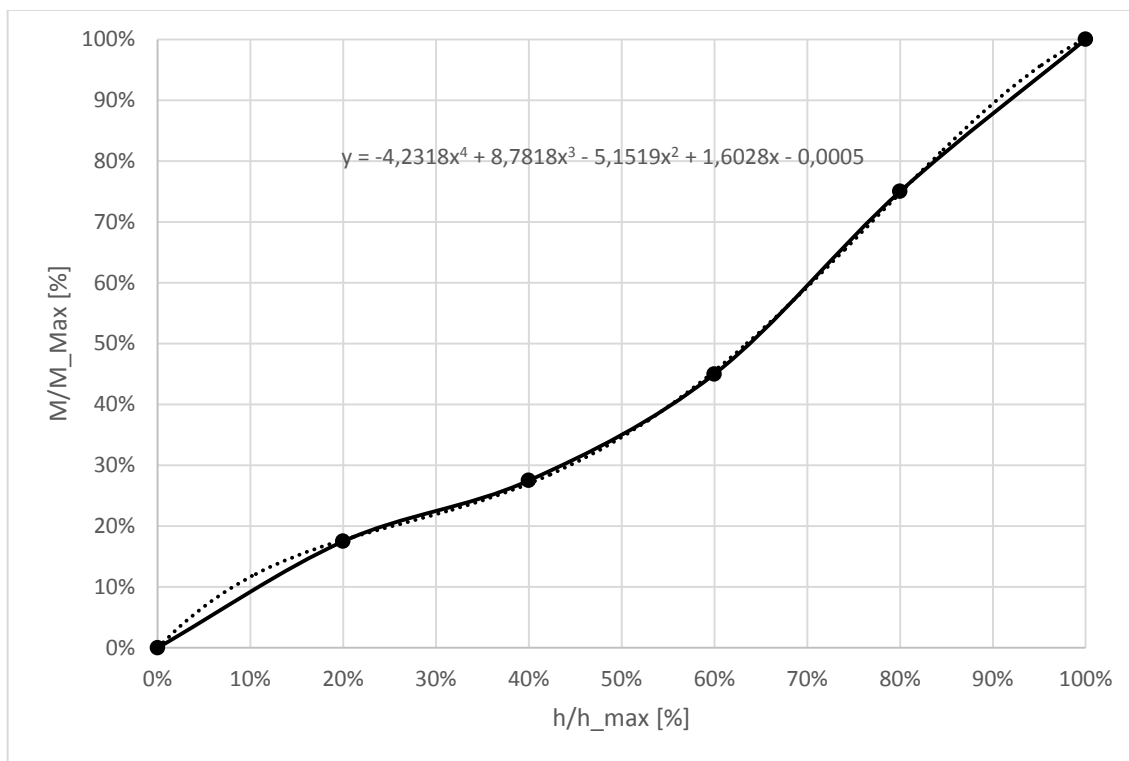
Výsledky simulací ukazují, že původní předpoklad začít vychlazovat okamžitě po zjištění stavu blackoutu, byl mylný. V parním generátoru se v tu dobu nachází velké množství horkého sekundárního chladiva, které je nutné ochlazovat pro možnost odvodu tepla z primárního okruhu. Toto sekundární chladivo vyžaduje k ochlazení sebe sama velké množství odvedené páry. Optimální je začít vychlazovat primární okruh v době, kdy je hladina v parním generátoru 1,95 m. V tuto dobu nastává optimální poměr sekundárního chladiva schopného odvézt maximální tepelnou energii z primárního okruhu při zachování maximální hladiny v parním generátoru. Konečná hladina, která bude dosažena při 240 °C ve studených větvích smyček primárního okruhu, je cca. 1 m. Toto množství chladiva bude dále využito pro odvod zbytkové tepelné energie z aktivní zóny, která je mnohonásobně menší než při vychlazování.

Bylo tedy navrženo doplnění současného manipulačního postupu o trvalý úkol, který prikazuje obsluze blokové dozorny zahájit vychlazování primárního okruhu v době, kdy se v parním generátoru nachází 1,95 m sekundárního chladiva.

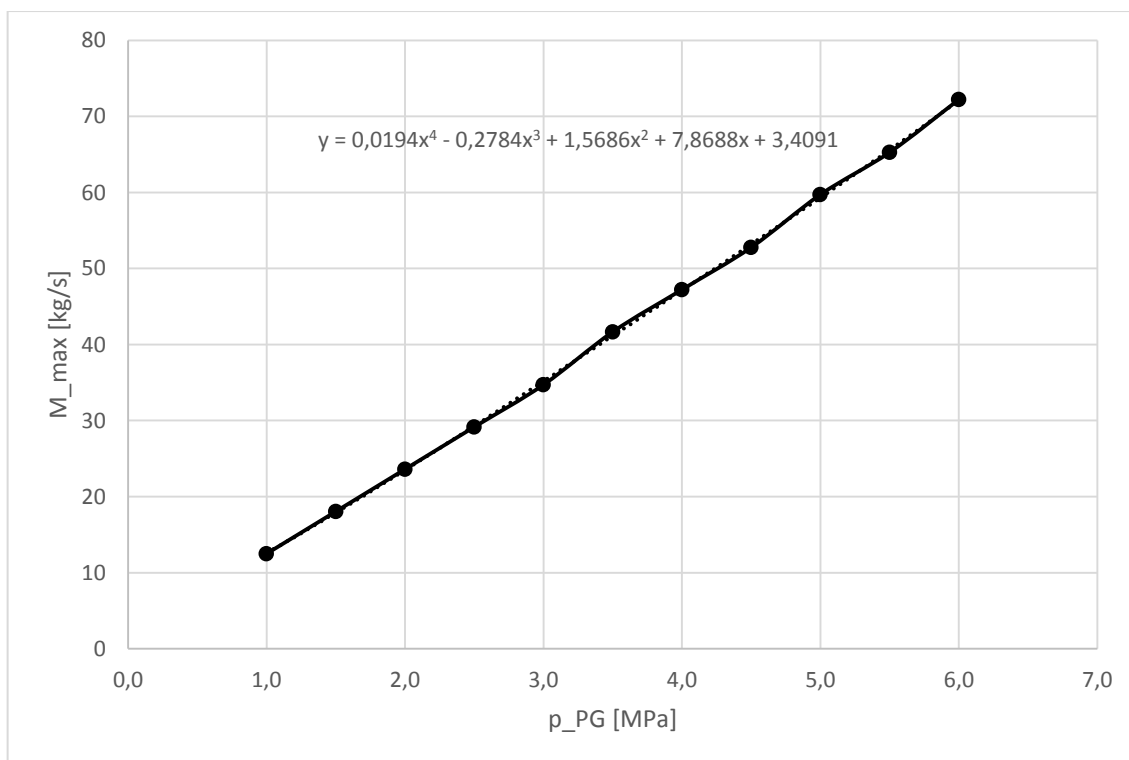
Dále simulace ukázaly, že pokud personál blokové dozorny nezačne vychlazovat nejpozději s hladinou v parním generátoru 1,55 m, nebude schopen dosáhnout cílové teploty 240 °C. PG nebudou schopné odvést potřebnou tepelnou energii a dojde k jejich úplnému vysušení. V tuto chvíli je na zvážení, zda začít vychlazovat primární okruh pro zabránění průrazu ucpávek hlavních cirkulačních čerpadel s tím, že dojde k úplnému vysušení PG a riskovat, že po obnovení jeho napájení by studená voda přišla do přímého kontaktu s horkou teplosměnnou plochou, což by mohlo vést k jejímu poškození a úniku primárního média do sekundárního okruhu. Alternativou by mohl být kompromis mezi vysušením PG a dosažením cílové teploty – vychlazením primárního okruhu na takovou teplotu, kdy ještě zůstane v parním generátoru dostatek chladiva pro odvod zbytkového tepla.

9 PŘÍLOHY

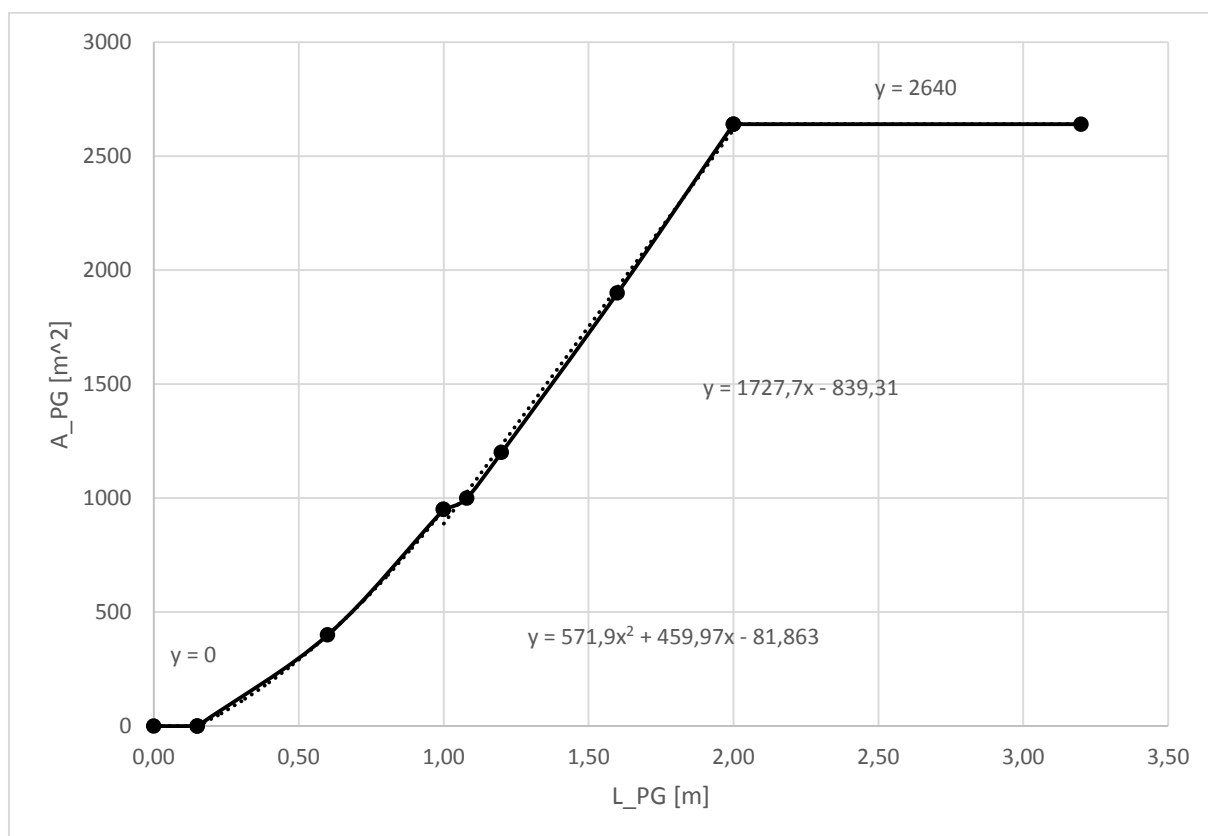
PR. 1 Aproximace závislosti poměrného maximálního průtoku PSA na poměrném otevření ventilu [29]



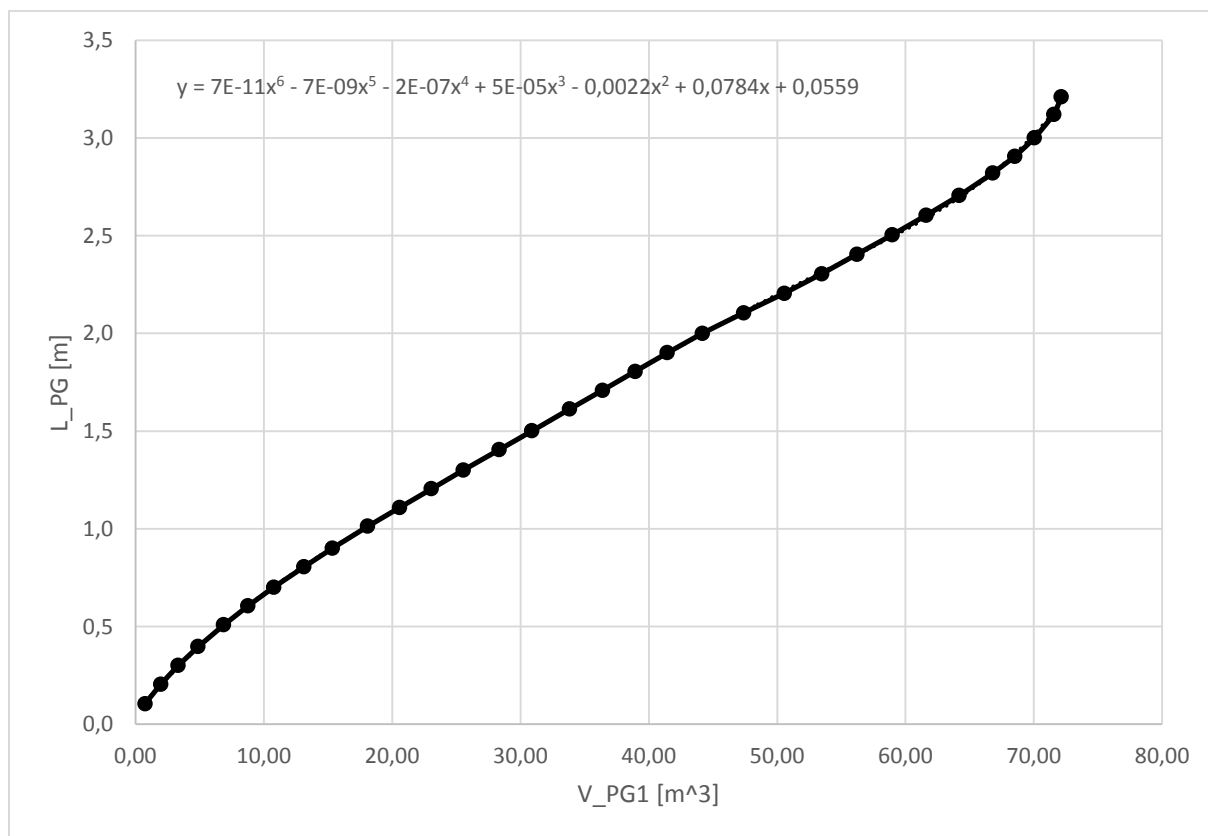
PR. 2 Aproximace maximální hlnosti PSA na tlaku v PG [29]

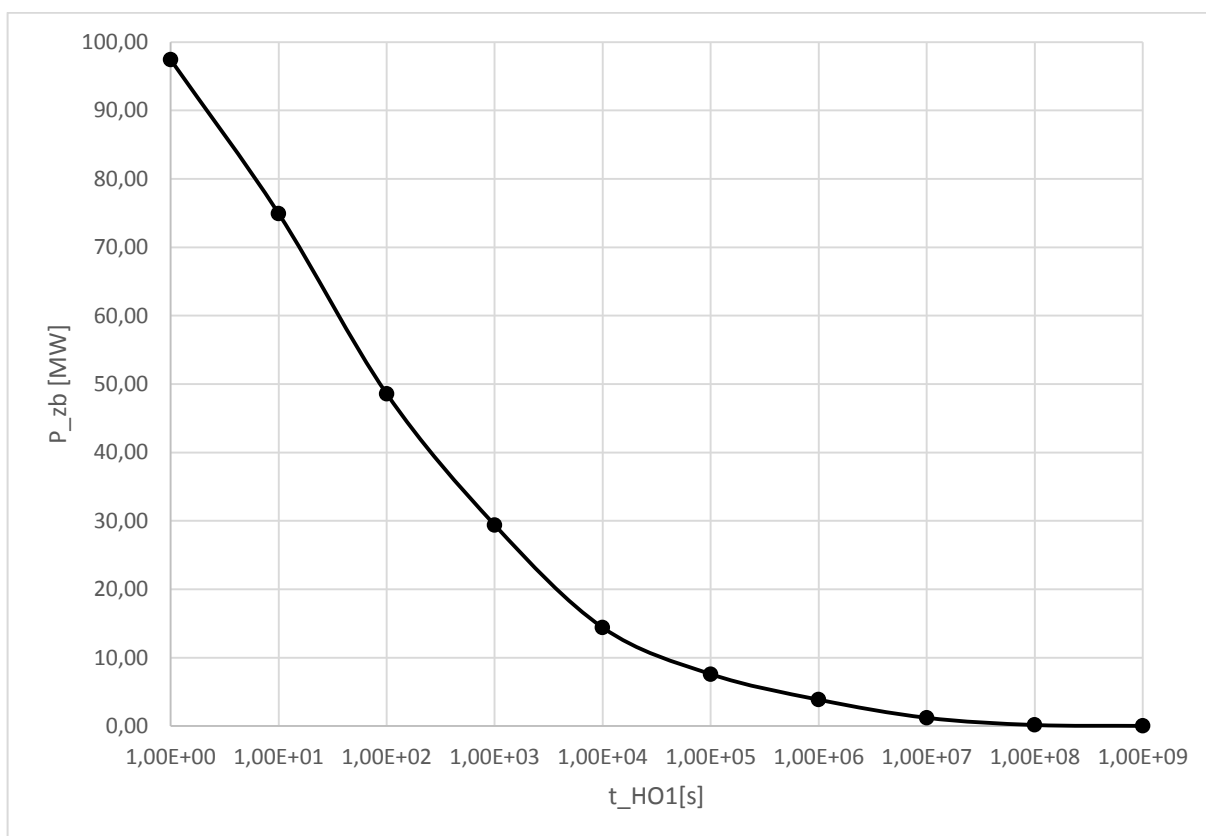


PR. 3 Aproximace závislosti velikosti teplosměnné plochy na hladině v PG [29]



PR. 4 Aproximace závislosti hladiny v PG na objemu chladiva v PG [29]



PR. 5 Průběh zbytkového výkonu aktivní zóny [29]

PR. 6 Objem chladiva a hmotnost konstrukčních prvků v jednotlivých částech výpočetního modelu [29]

část	prvek	V_{chl1}	n	V_{chl}	V_{kov}	ρ_{kov}	m_{kov1}	n	m_{kov}
		[m3]	[-]	[m3]	[m3]	[kg/m3]	[kg]	[-]	[kg]
HVS	víko	15,59	1	15,59			42 140	1	42 140
	nádoba						75 940	1	75 940
	BOT	25,33	1	25,33			35 200	1	35 200
	šachta						37 900	1	37 900
	HVS	2,60	6	15,60					
					1,08	7840	8 452	6	50 712
	horký kolektor	1,74	6	10,45					
	vlož. Tyč						61	37	2257
	HRK horní						110	37	4070
	celkem			66,97					248 219
AZ	AZ	7,59	1	7,59					
	KAZ	4,43	1	4,43			22 000	1	22 000
	kazeta						225	312	70 200
	HRK						220	37	8140
	celkem			12,01					100 340
SVS	studený kolektor	1,74	6	10,45					
	SVS	3,70	6	22,20	0,72	7840	5679	6	34073
	nádoba						68 200	1	68 200
	šachta-nádoba	18,27	1	18,27					
	dno	22,45	1	22,45			30 075	1	30 075
				72,64					132 348
PG IO	celkem	8,92	6	53,54			27 213	6	163 278
PG IIO	celkem	44,18	6	265,08			169 000	6	1 014 000
parovody	potrubí	127,17	1	127,17	20,74	7850	162 807	1	162 807
	celkem			127,17					162 807

PR. 7 Seznam konstant využitých v modelu [29]

název	veličina	hodnota	jednotka
tlak v primárním okruhu	p_{IO}	12,36	MPa
průtočný průřez primární části PG	S_{PG}	0,757 6	m ²
vnitřní průměr trubky PG	D_{in}	0,013 2	m
vnitřní poloměr trubky PG	r_{in}	0,006 6	m
vnější průměr trubky PG	D_{out}	0,016	m
vnější poloměr trubky v PG	r_{out}	0,008	m
počet trubiček	n_{tr}	5 536	-
teplosměnná plocha	$A_{PG,nom}$	2 640	m ²
střední délka trubky	L_{1tr}	9,418	m
délka TSP	$L_{TSP,nom}$	52 138	m
počet PG v primárním okruhu	n_{PG}	6	-

PR. 8 Odečtené počáteční stavy pro různé varianty simulací [31]

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
čas vzniku blackoutu od odstavení reaktoru	t_{BO}	s	360	600	1 200	1 800	2 400	3 600
zbytkový výkon aktivní zóny	P_{AZ}	MW	43,05	37,93	29,07	28,07	27,07	25,07
hladina v PG	L_{PG}	m	2,02	1,97	1,88	1,80	1,71	1,55
teplota horkých větví smyček	t_{HVS}	°C	284,1	281,7	279,1	278,9	278,9	278,9
teplota studených větví smyček	t_{SVS}	°C	267,2	264,5	264,4	264,4	264,4	264,4
tlak v PG	p_{PG}	MPa	4,96	4,98	5,00	5,00	5,00	5,00

PR. 9 Vypočtené počáteční stavy PG pro různé varianty simulací

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
teplota páry	t_P	°C	263,4	263,7	263,9	263,9	263,9	263,9
entalpie syté páry	i''	kJ/kg	2 794,6	2 794,4	2 794,2	2 794,2	2 794,2	2 794,2
entalpie syté kapaliny	i'	kJ/kg	1 152,0	1 153,3	1 154,5	1 154,5	1 154,5	1 154,5
výparné teplo	l_{PG}	kJ/kg	1 642,6	1 641,0	1 639,8	1 639,7	1 639,7	1 639,7
výkon odvedený jedním PG	P_{PG}	MW	7,17	6,32	4,84	4,68	4,51	4,18
teplosměnná plocha	A_{PG}	m ²	2 640	2 578	2 411	2 261	2 111	1 814
objem sekundárního chladiva v jednom PG	V_{PG}	m ³	44,75	43,26	40,82	38,69	36,53	32,21
poměrná teplosměnná plocha	a_{PG}	%	100	98	91	86	80	69
délka teplosměnné plochy	L_{TSP}	m	52 138	50 919	47 360	44 667	41 693	35 843
hmotnost chladiva v jednom PG	m_{PG}	kg	34 820	33 645	31 728	30 076	28 397	25 042
tepelná energie chladiva	E_{chl}	MJ	240 668	232 826	219 776	208 336	196 706	173 468
tepelná energie konstrukčních částí	E_{kov}	MJ	122 877	123 005	123 110	123 113	123 113	123 113

PR. 10 Vypočtené počáteční stavy studených větví smyček pro různé varianty simulací

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
entalpie chladiva	i_{SVS}	kJ/kg	1 169,3	1 156,1	1 155,2	1 155,2	1 155,2	1 155,2
teplota chladiva	t_{SVS}	°C	267,2	264,5	264,4	264,4	264,4	264,4
hustota chladiva	ρ_{SVS}	kg/m ³	781,6	786,0	786,2	786,2	786,2	786,2
hmotnost chladiva	m_{SVS}	kg	56 781	57 096	57 116	57 116	57 116	57 116
tepelná energie chladiva	E_{chl}	MJ	66 393	66 007	65 782	65 782	65 782	65 982
tepelná energie konstrukčních částí	E_{kov}	MJ	16 267	16 104	16 094	16 094	16 094	16 094

PR. 11 Vypočtené počáteční stavy horkých větví smyček pro různé varianty simulací

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
entalpie chladiva	i_{HVS}	kJ/kg	1 254,8	1 242,7	1 229,4	1 228,0	1 228,0	1 228,0
teplota chladiva	t_{HVS}	°C	284,1	281,7	279,1	278,9	278,9	278,9
hustota chladiva	ρ_{HVS}	kg/m ³	752,2	756,6	761,2	761,7	761,7	761,7
hmotnost chladiva	m_{HVS}	kg	50 380	50 667	50 782	51 013	51 013	51 013
tepelná energie chladiva	E_{chl}	MJ	63 218	62 965	62 675	62 645	62 645	62 645
tepelná energie konstrukčních částí	E_{kov}	MJ	32 435	32 167	31 872	31 842	31 842	31 842

PR. 12 Vypočtené počáteční stavy aktivní zóny pro různé varianty simulací

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
vzrůst entalpie v aktivní zóně	Δi_{AZ}	kJ/kg	85,5	86,6	74,1	72,8	72,8	72,8
průtok chladiva přes aktivní zónu	M_{AZ}	kg/s	503,2	438,0	392,1	385,7	371,9	353,2
entalpie chladiva	i_{AZ}	kJ/kg	1 212,0	1 199,4	1 192,3	1 191,6	1 191,6	1 191,6
teplota chladiva	t_{AZ}	°C	275,7	273,2	271,8	271,7	271,7	271,7
hustota chladiva	ρ_{AZ}	kg/m ³	767,2	771,6	774,0	774,2	774,2	774,2
hmotnost chladiva	m_{AZ}	kg	9 216	9 268	9 297	9 300	9 300	9 300
tepelná energie chladiva	E_{chl}	MJ	11 170	11 116	11 085	11 082	11 082	11 082
tepelná energie konstrukčních částí	E_{kov}	MJ	12 727	12 611	12 546	12 540	12 540	12 540

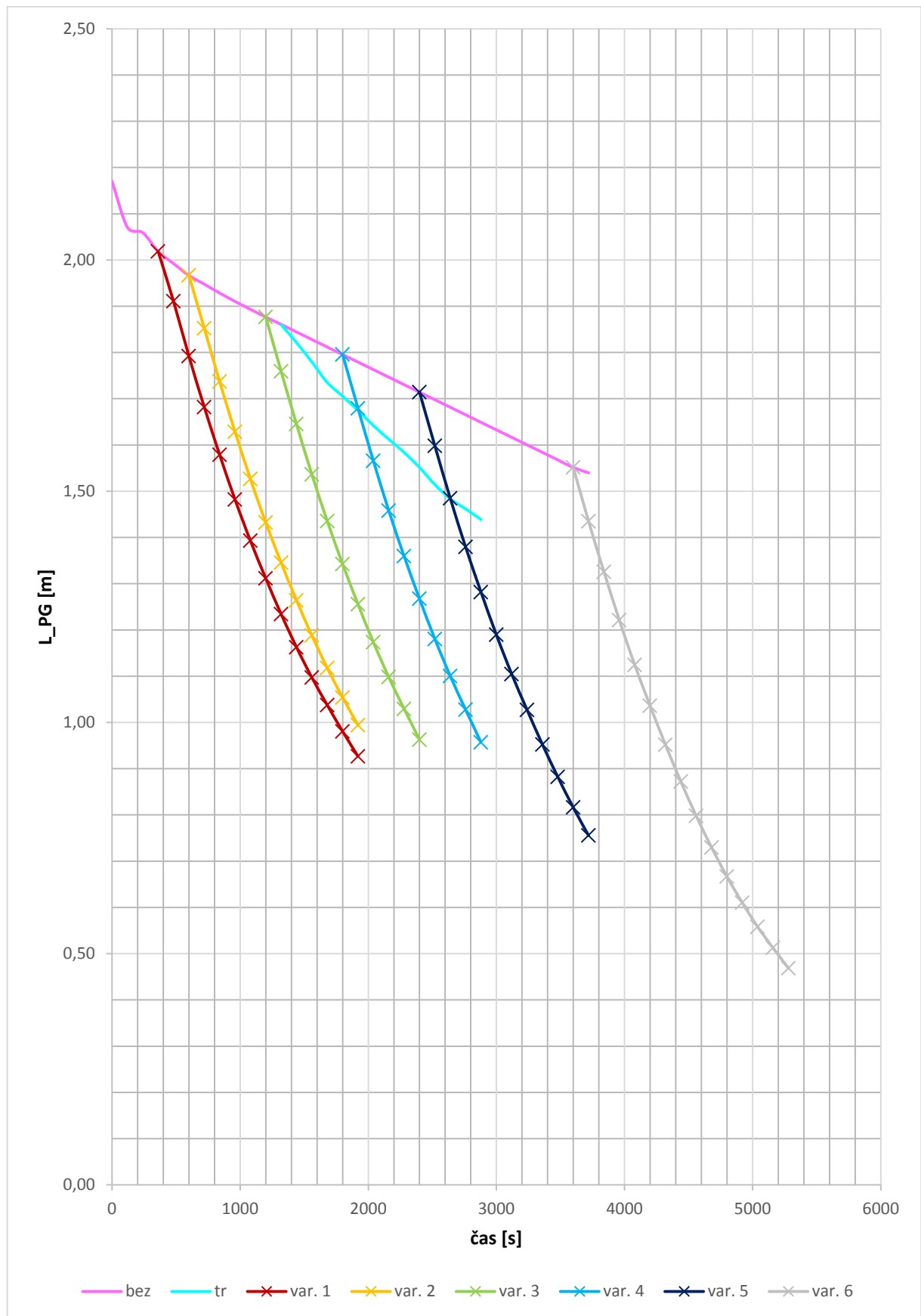
PR. 13 Vypočtené počáteční stavy primární části PG pro různé varianty simulací

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
entalpie chladiva	\dot{i}_{PGIO}	kJ/kg	1 212,0	1 199,4	1 192,3	1 191,6	1 191,6	1 191,6
teplota chladiva	t_{PGIO}	°C	275,7	273,2	271,8	271,7	271,7	271,7
hustota chladiva	ρ_{PGIO}	kg/m ³	767,2	771,6	774,0	774,2	774,2	774,2
hmotnost chladiva	m_{PGIO}	kg	41 076	41 308	41 436	41 449	41 449	41 449
tepelná energie chladiva	E_{chl}	MJ	49 786	79 543	49 404	49 391	49 391	49 391
tepelná energie konstrukčních částí	E_{kov}	MJ	20 710	20 521	20 415	20 405	20 405	20 405

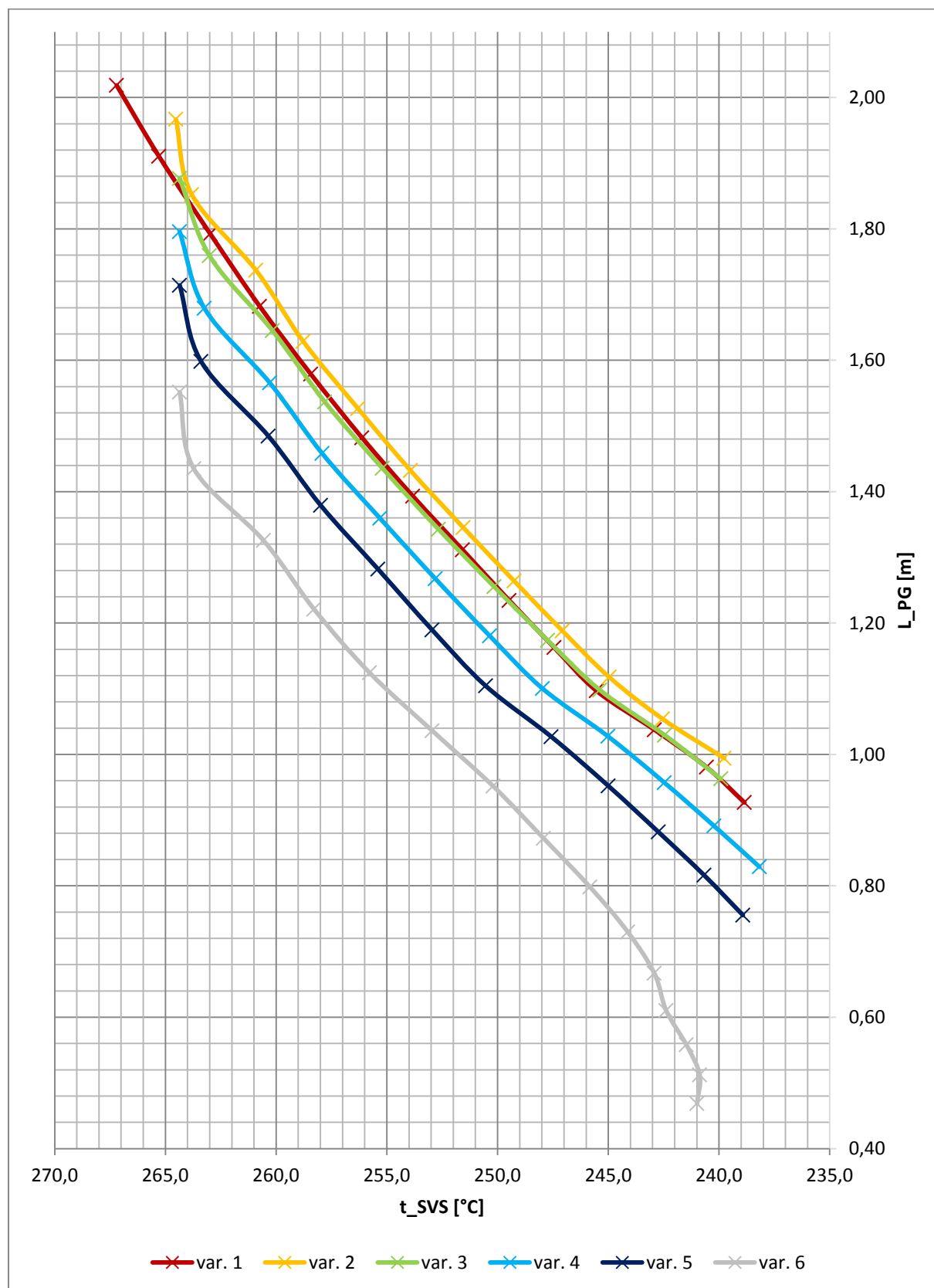
PR. 14 Vypočtené počáteční stavy PSA pro různé varianty simulací

parametr			varianta					
			1	2	3	4	5	6
odváděný výkon	P_{PSA}	MW	43,05	37,93	29,07	28,07	27,07	25,70
průtok	M_{PSA}	kg/s	26,21	23,11	17,73	17,12	16,51	15,68
maximální možný průtok	M_{max}	kg/s	58,90	59,17	59,40	59,40	59,40	59,40
poměrný průtok PSA1	M_1/M_{max}	%	44,50	39,06	29,84	28,81	27,79	26,39
otevření PSA1	h_1/h_{max}	%	60,58	51,13	41,17	39,60	38,02	35,83
poměrný průtok PSA2	M_2/M_{max}	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
otevření PSA2	h_2/h_{max}	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

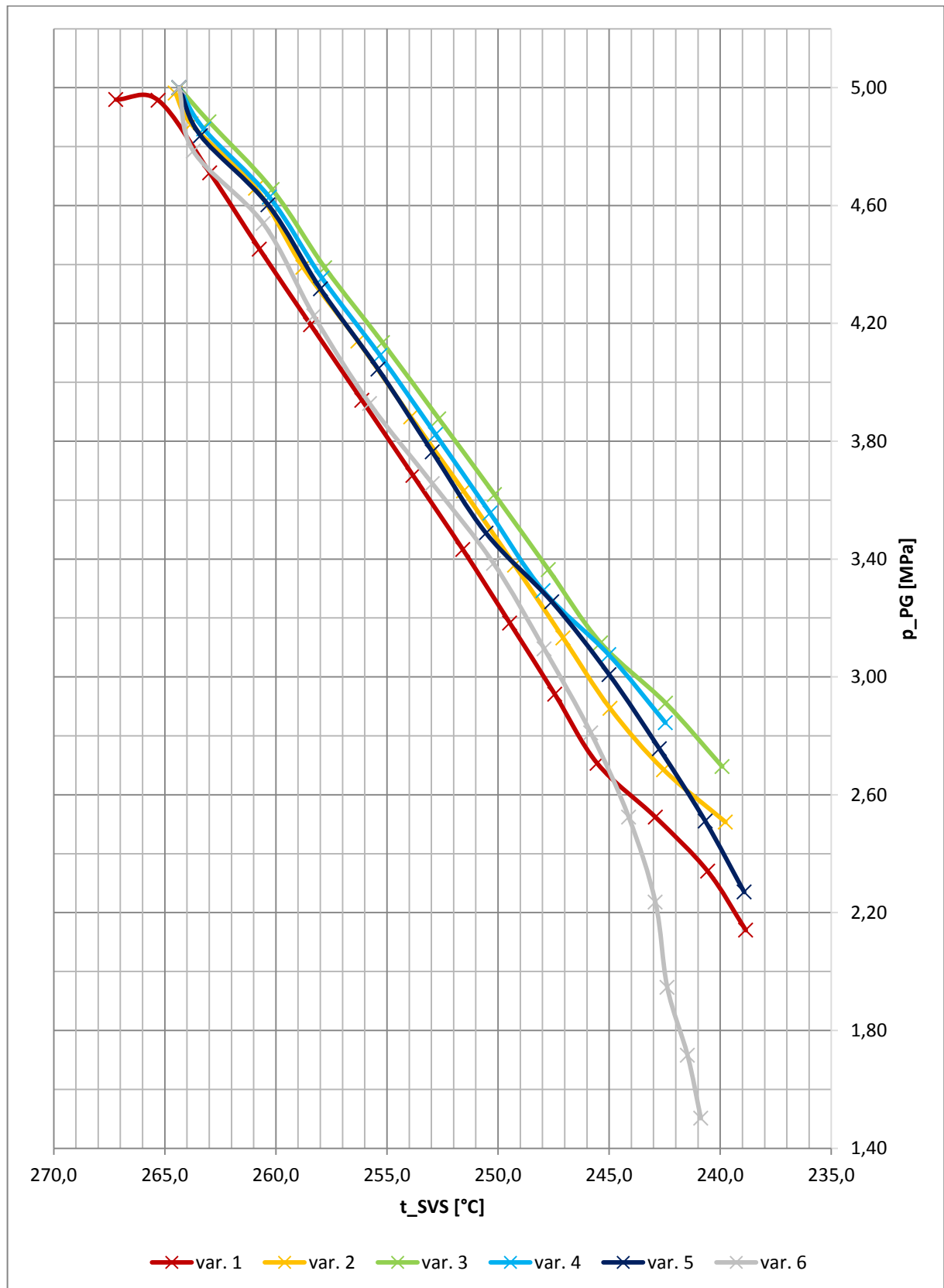
PR. 15 Časový průběh hladiny v PG pro různé varianty simulací



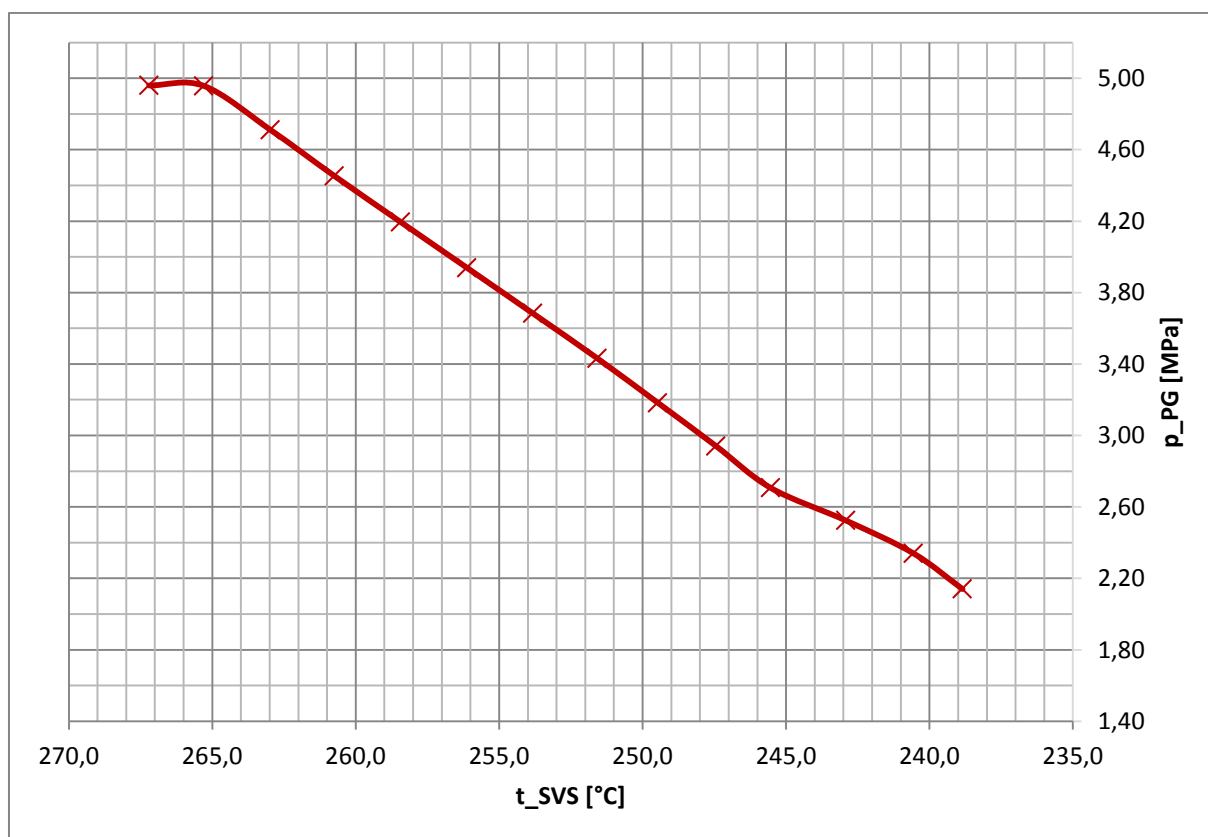
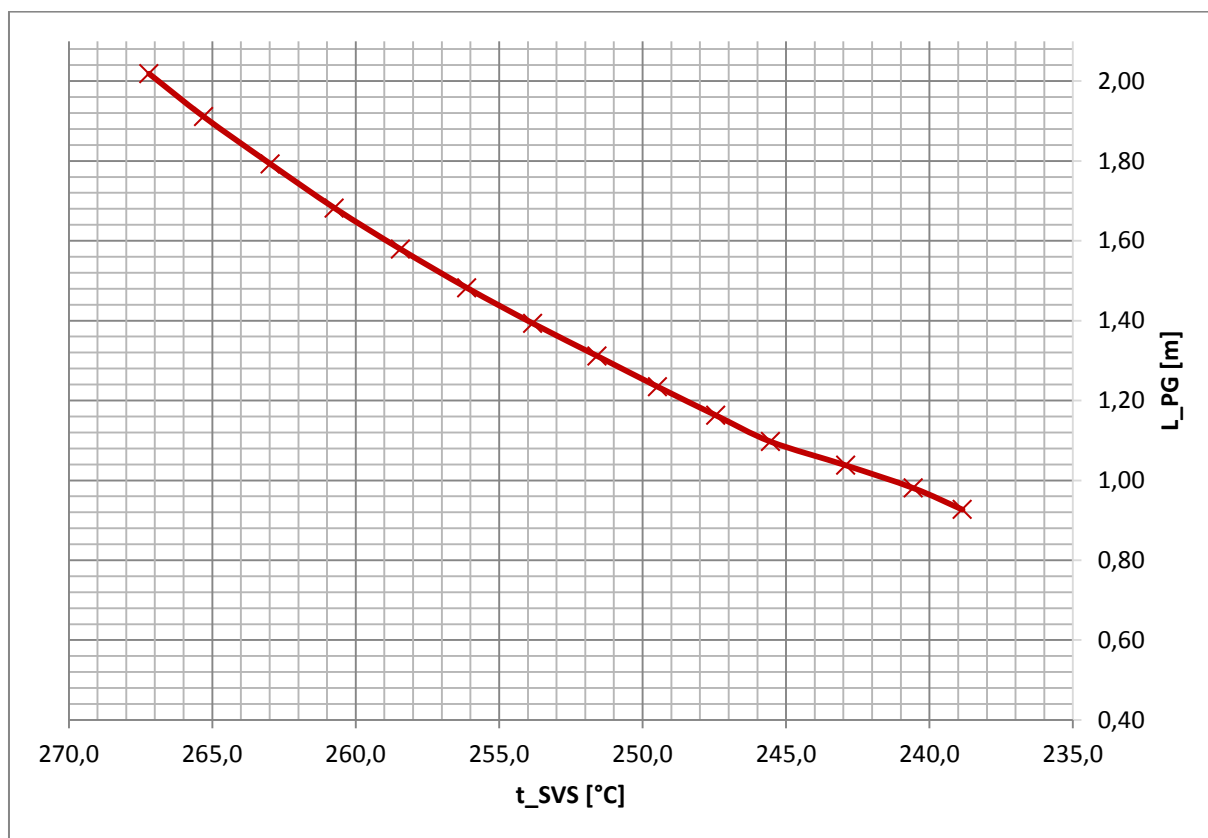
PR. 16 Průběhy hladiny v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro všechny varianty simulací



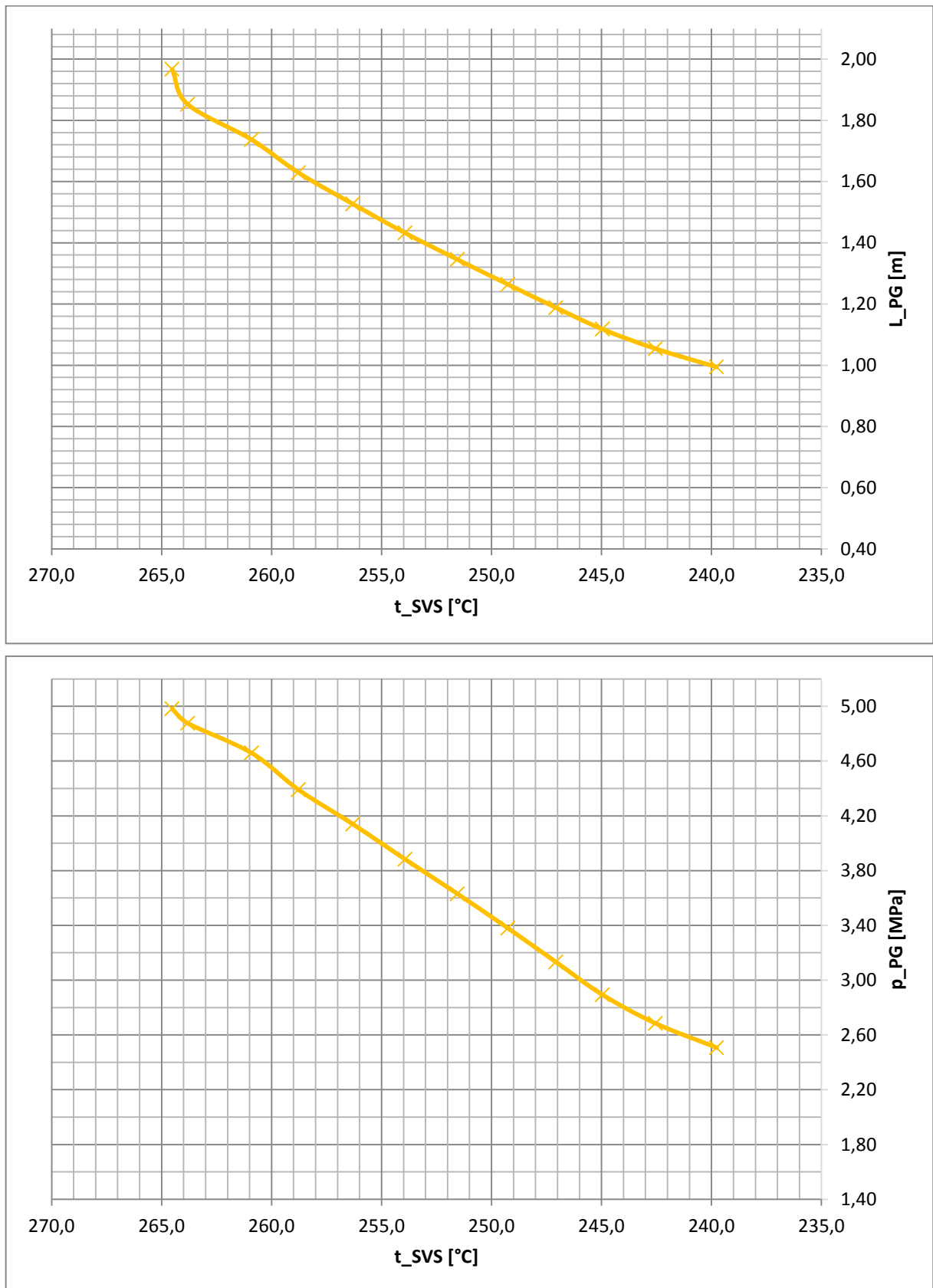
PR. 17 Průběhy tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro všechny varianty simulací



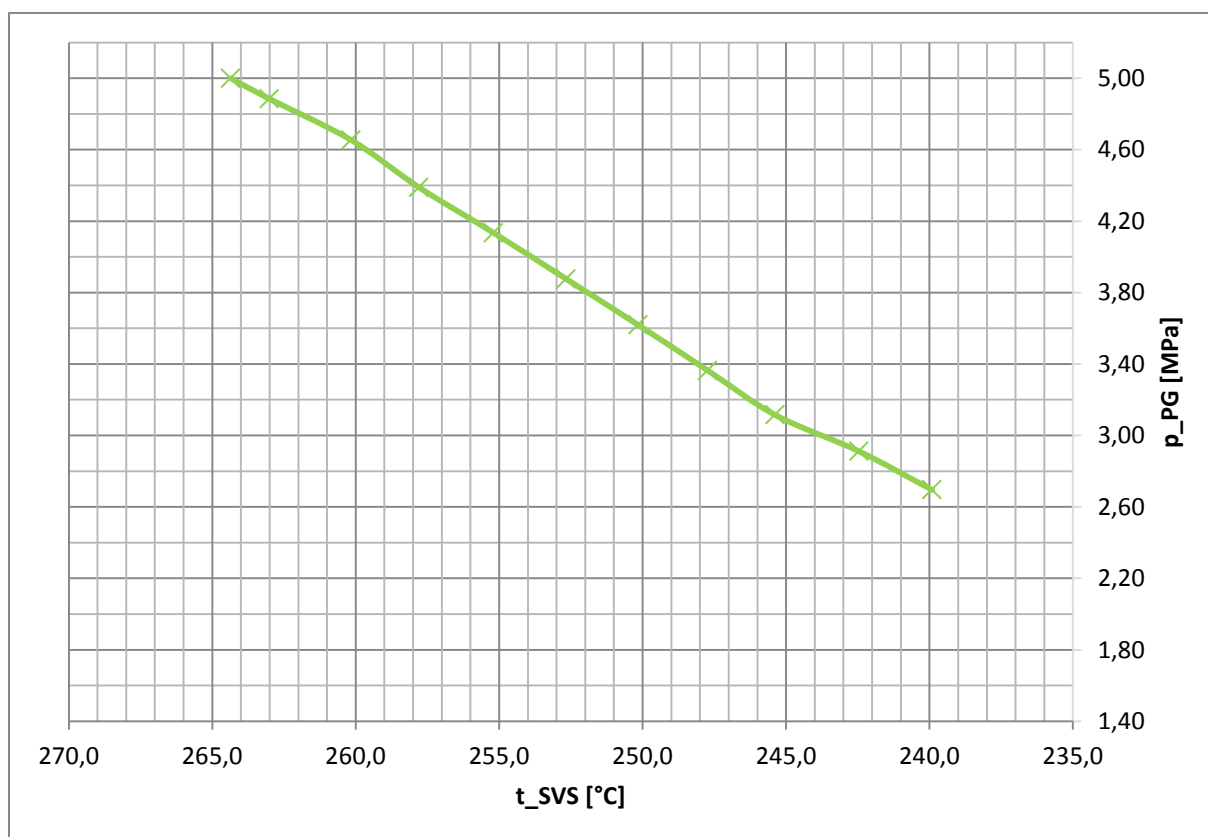
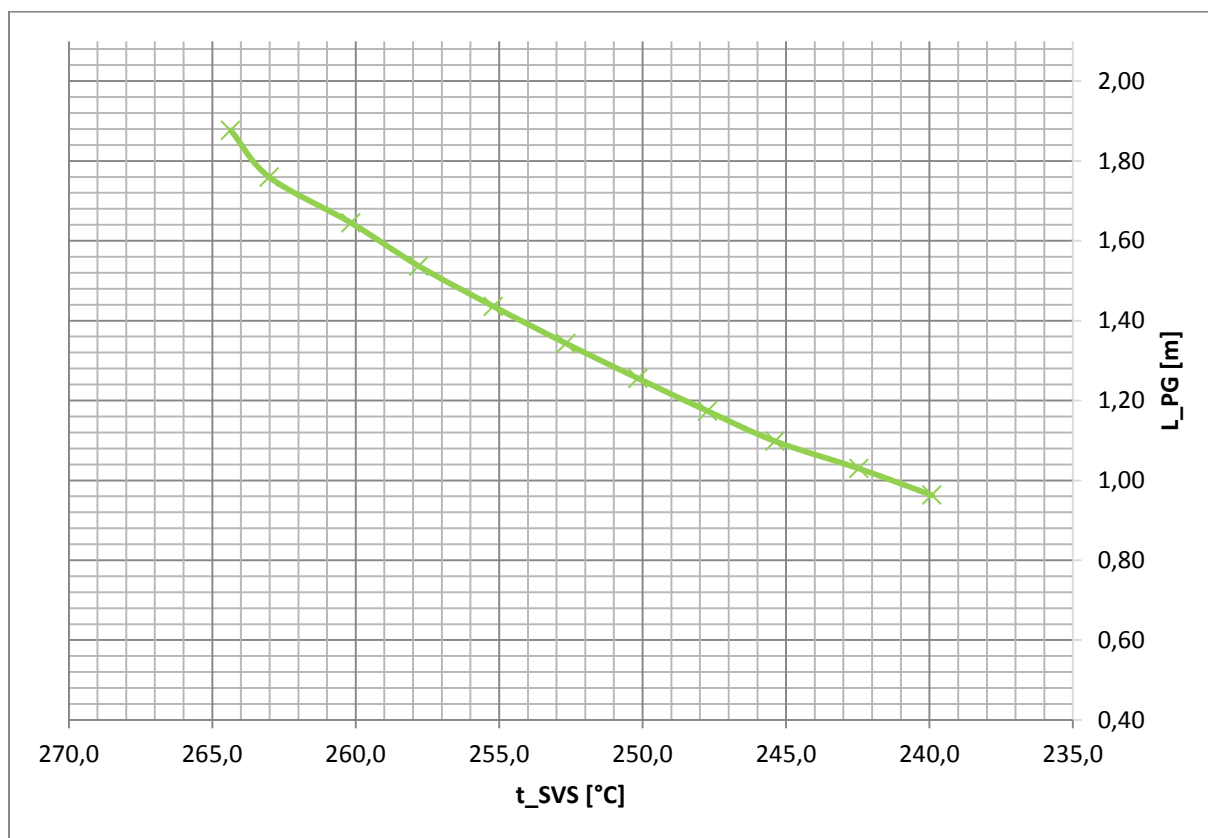
PR. 18 Průběhy hladiny a tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro variantu s počátkem blackoutu v 360. sekundě



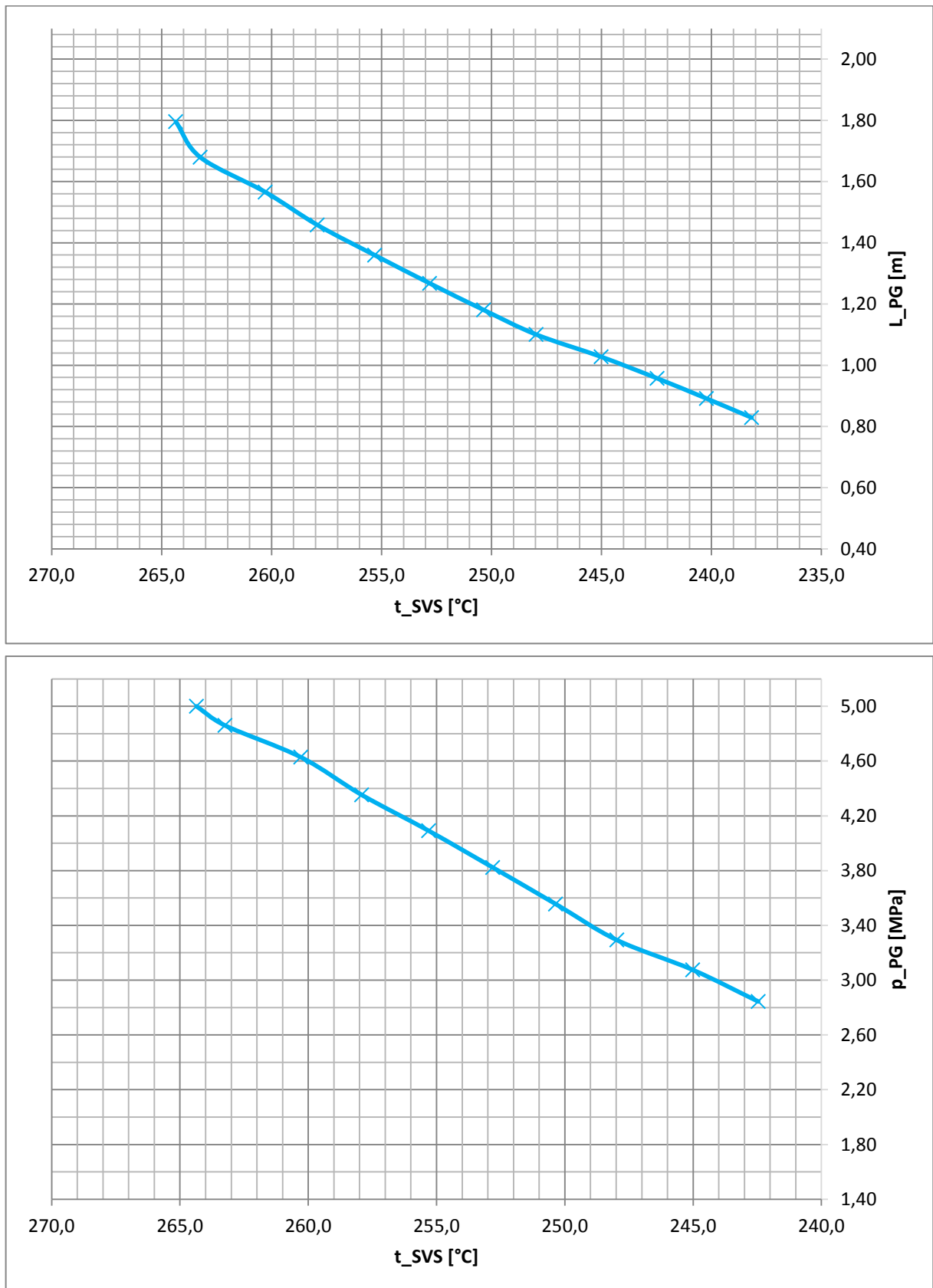
PR. 19 Průběhy hladiny a tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro variantu s počátkem blackoutu v 600. sekundě



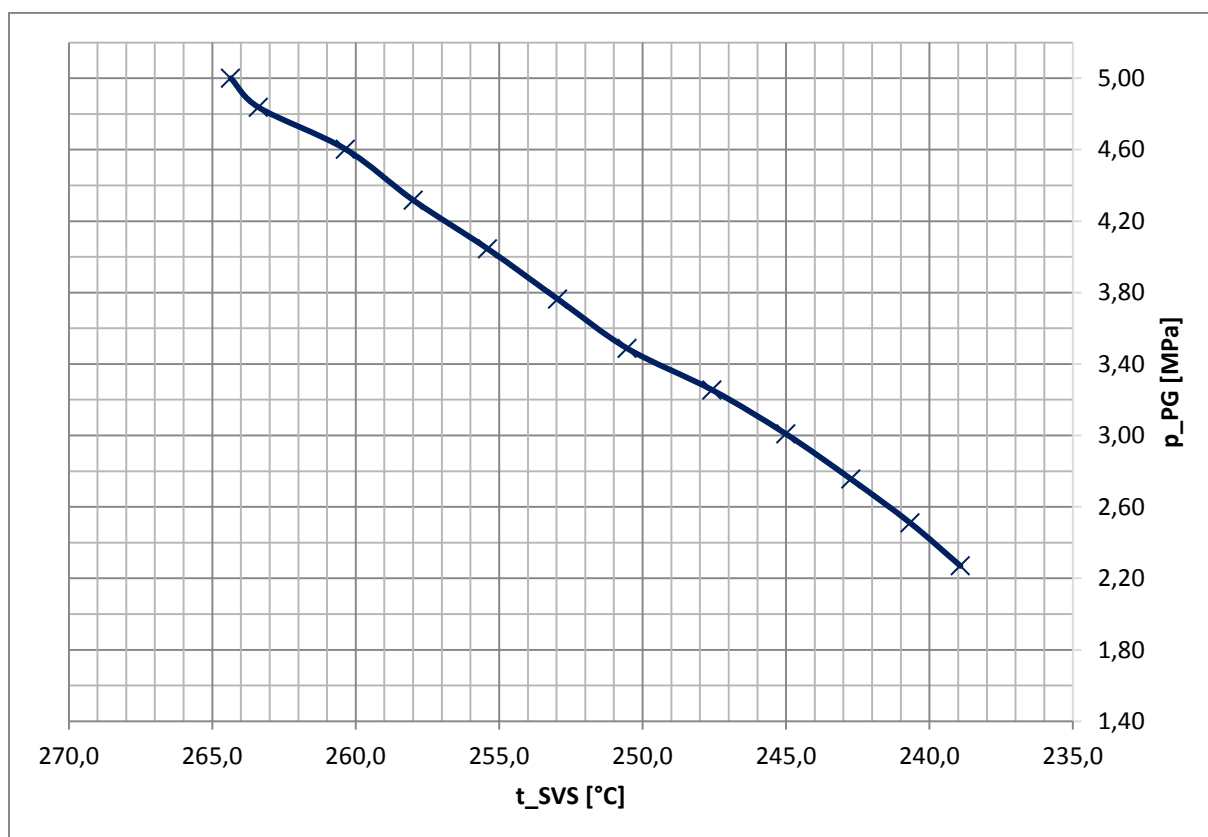
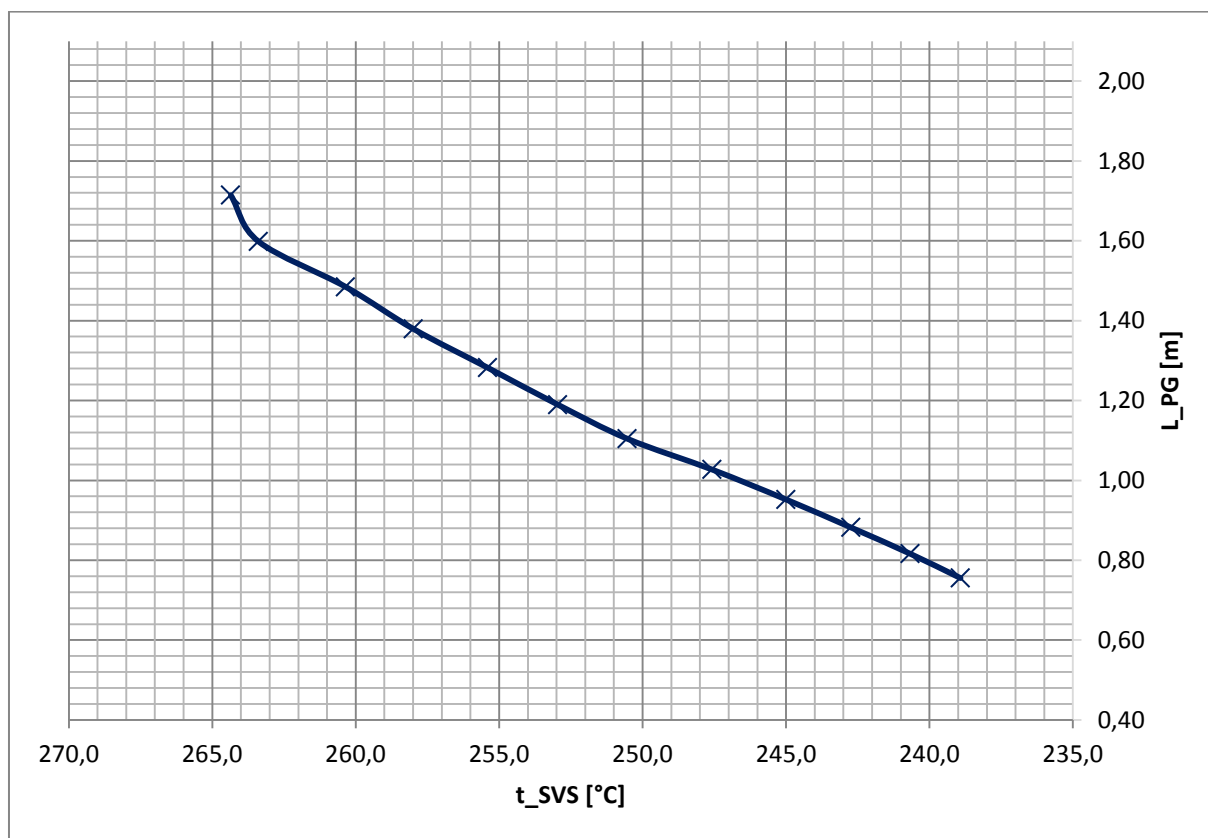
PR. 20 Průběh hladiny a tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro variantu s počátkem blackoutu v 1200. sekundě



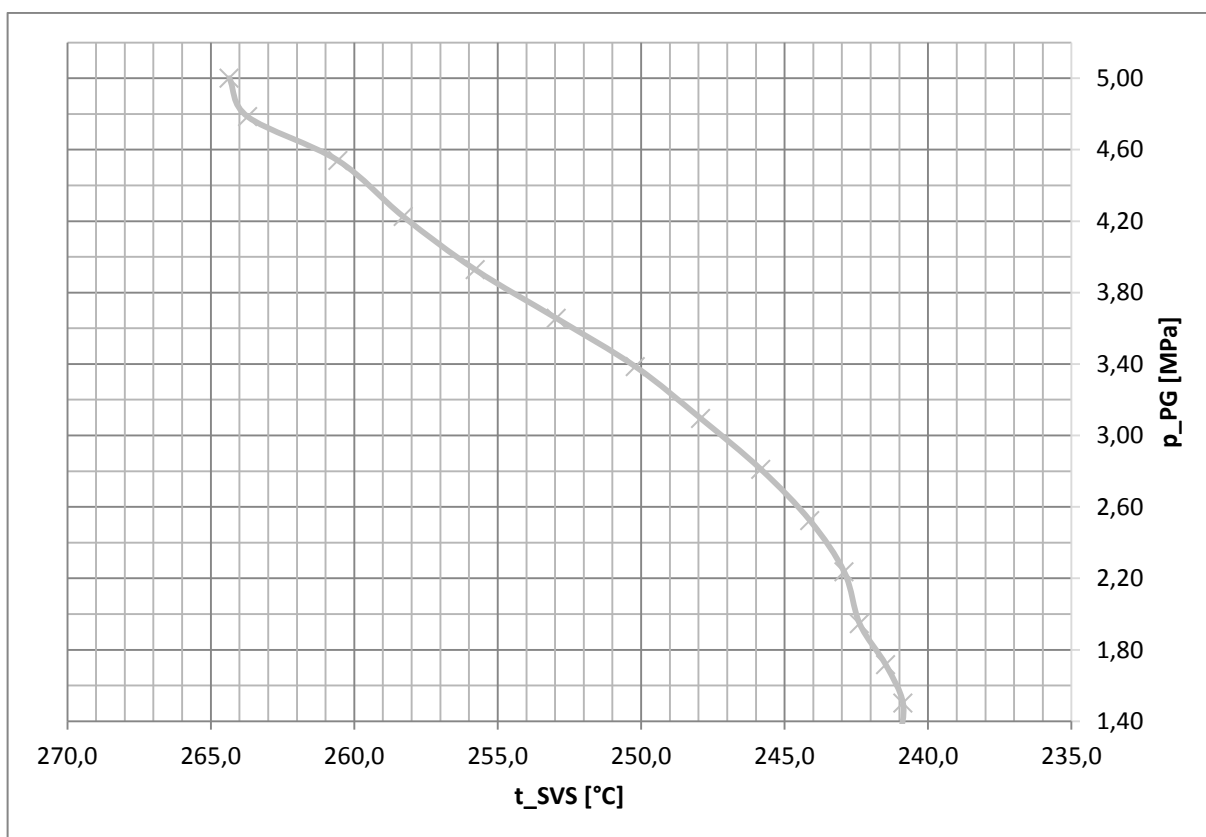
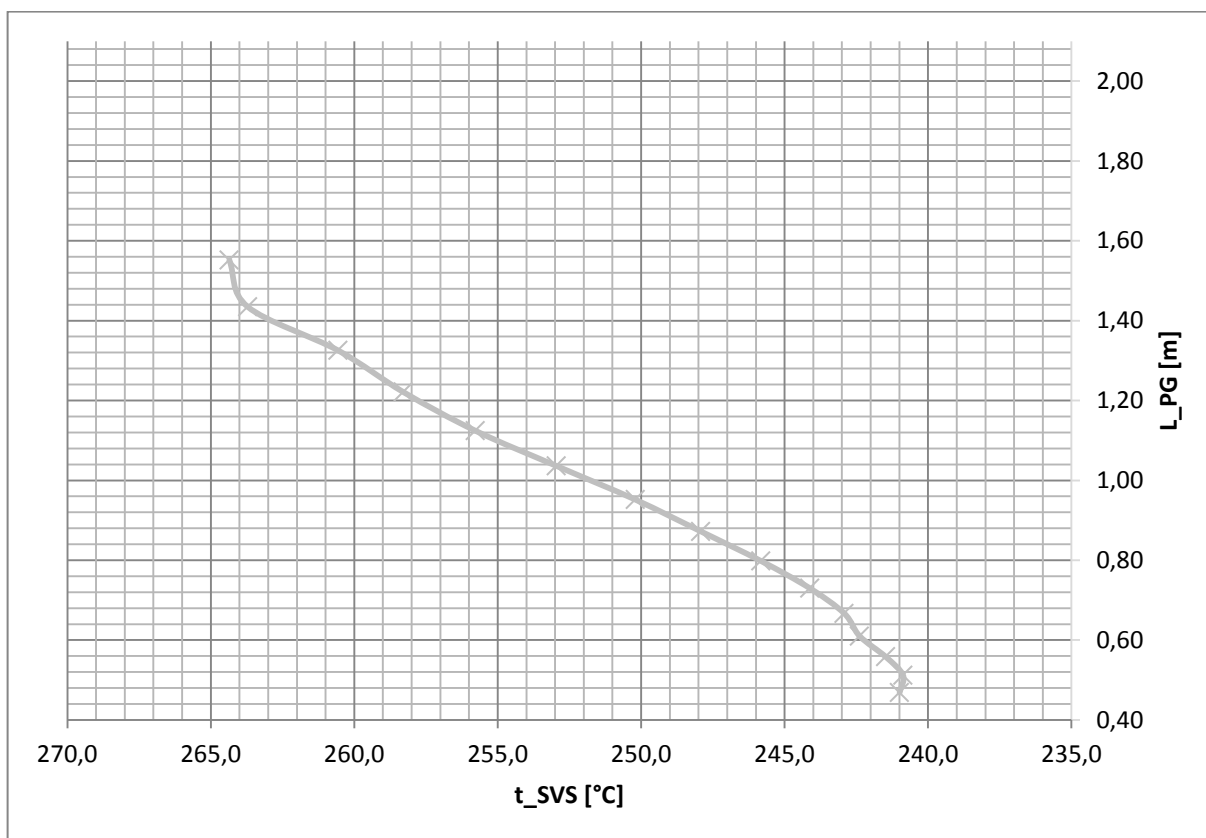
PR. 21 Průběh hladiny a tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro variantu s počátkem blackoutu v 1800. sekundě



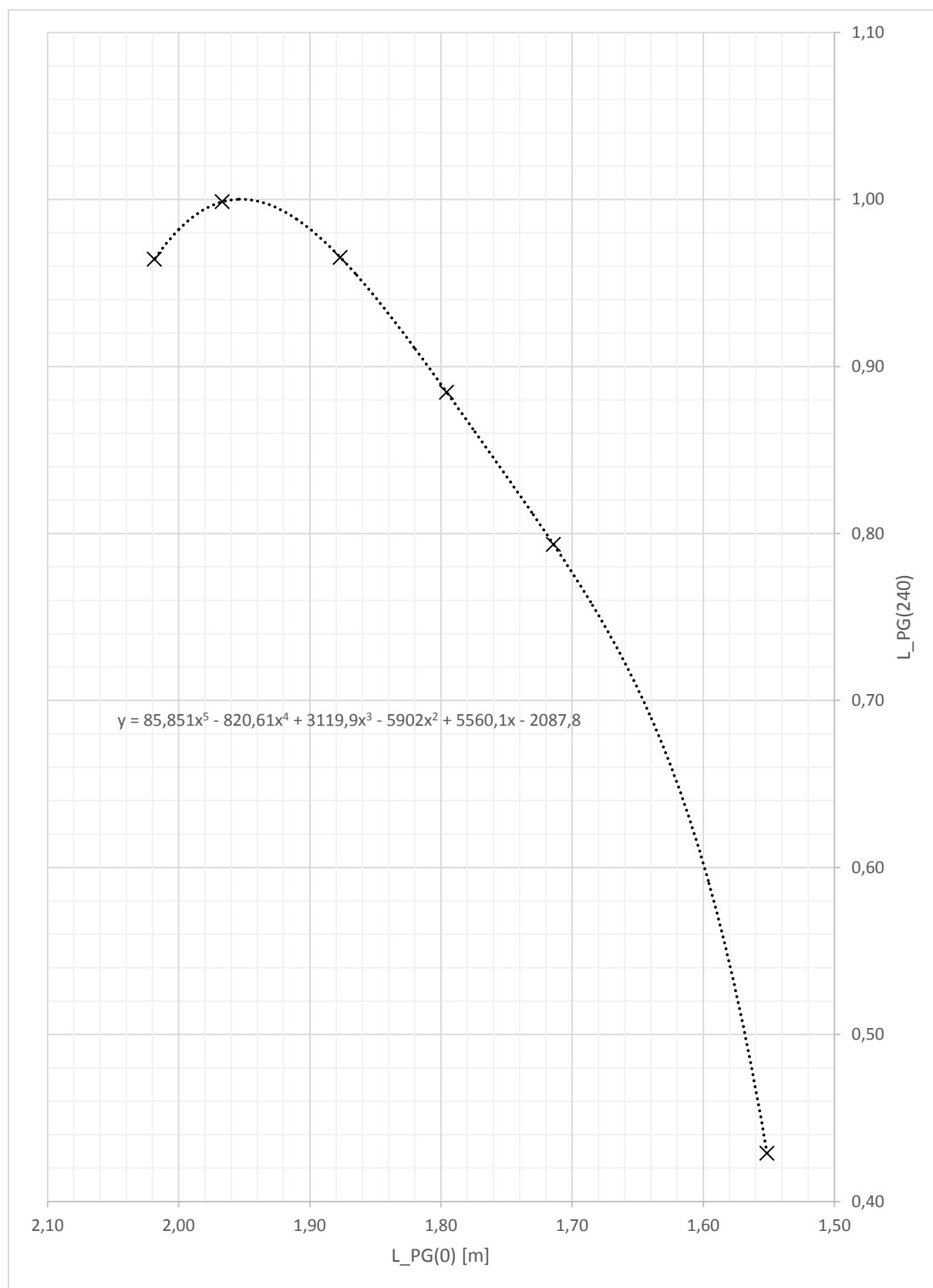
PR. 22 Průběh hladiny a tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro variantu s počátkem blackoutu v 2400. sekundě



PR. 23 Průběh hladiny a tlaku v PG v závislosti na teplotě studené větve smyčky pro variantu s počátkem blackoutu v 3600. sekundě



PR. 24 Graf závislosti konečné hladiny v PG na hladině v PG při počátku vychlazování



10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] CENCINGER, František. *PRIMÁRNÍ ČÁST JE VVER 440: Základní zařízení primárního okruhu: Textová část*. Brno, 2007.
- [2] CENCINGER, František. *PRIMÁRNÍ ČÁST JE VVER 440: Základní zařízení primárního okruhu, obrázková část*. Brno, 2006.
- [3] GLÜCK, Bernd. *Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete*. Teilauf. Frankfurt (Main): Verl.- u. Wirtschaftsges. d. Elektrizitätswerke mbH, 1985. ISBN 38-022-0095-0.
- [4] HOFMANN, Ervín. *ECA-0.0: ZTRÁTA ELEKTRICKÉHO NAPÁJENÍ - BLACKOUT*. Dukovany, 2016.
- [5] HOFMANN, Ervín. *F-0.4: Integrita I.O.* Dukovany, 2016.
- [6] HORSKÝ, Jaroslav. *Termohydraulika vybraných částí parogenerátoru PGV - 213*. Brno: VUT FSI, 1989.
- [7] CHARVÁT, Lubomír. *P015p: Parní generátor PG V213*. Dukovany, 2016.
- [8] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021420294.
- [9] MATAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2028-6.
- [10] NOVÁČEK, Martin. *B155j: Požadavky na provozuschopnost a ověřování DAM prostředků*. Dukovany, 2016.
- [11] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika*. Vyd. 6. Brno: Novpress, 2014. ISBN 9788021449909.
- [12] ROUPEC, Petr. *Analýza přestupu tepla v parogenerátorech bloků VVER 440*. Brno, 2010.
- [13] ŠKRANC, Karel. *SEKUNDÁRNÍ ČÁST JE VVER 440: I. díl*. Brno, 2015.
- [14] TRNKA, Miroslav. *Konzultace*. 2017. Dukovany.
- [15] VRANKA, Lubomír, Peter MATEJOVIČ a Martin BACHRATÝ. *Vychladzovanie PO činnosťou 1 PSA po inicičnej udalosti typu "blackout" na JE Dukovany*. Trnava, 1998.
- [16] Lithuania restates Visaginas commitment. *World nuclear new* [online]. 2014 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Lithuania-restates-Visaginas-commitment-0304148.html>
- [17] Historie a současnost Elektrárny Temelín. *ČEZ.cz* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderne-elektřiny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html>
- [18] Infografika: Výstavba jaderných bloků v Evropě Více na: <http://oenergetice.cz/jaderne-elektřiny/infografika-vystavba-jadernych-bloku-v-evrope/>. *O ENERGETICE.cz* [online].

- 2016 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/infografika-vystavba-jadernych-bloku-v-evrope/>
- [19] *Roční zpráva o provozu ES ČR* [online]. 2015, **2015** [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf
- [20] *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v České republice* [online]. 2015, **2015** [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54251/61936/640148/priloha001.pdf>
- [21] Stavba ochranných PST transformátorů proti přetokům z Německa zahájena. *O ENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/stavba-ochrannych-pst-transformatoru-proti-pretokum-z-nemecka-zahajena/>
- [22] Energetika ve světě. *ČEZ.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete.html>
- [23] *Nuclear Power Reactors in the World* [online]. Vídeň, 2016, **2016**(1) [cit. 2016-12-27]. ISBN 978–92–0–103716–9. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS_2-36_web.pdf
- [24] Jaderná energetika ve světě. *ČEZ.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/je-ve-svete.html>
- [25] Před rokem ČEZ zrušil tendr na dostavbu JE Temelín. *Atom info.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2015/04/pred-rokem-cez-zrusil-tendr-na-dostavbu-je-temelin/>
- [26] THE EPR™ REACTOR PROJECTS WORLDWIDE. *Areva* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.areva.com/EN/operations-2542/the-epr-reactor-projects-worldwide.html>
- [27] Jaderná elektrárna Dukovany. *O ENERGETICE.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-dukovany/>
- [28] Blackouty – 1. část: Největší blackouty v historii lidstva. *O ENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/blackouty-1-cast-nejvetsi-blackouty-v-historii-lidstva/>
- [29] *Předprovozní bezpečnostní zpráva EDU*. Dukovany, 2016.
- [30] ŽÁK, Jiří. *Studie blackoutů s ohledem na jadernou elektrárnu Dukovany*. 2013.
- [31] *Data ze simulátoru EDU ze dne 27. 4. 2017*